

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Physique des matériaux**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Florent DETTONI

Thèse dirigée par **François BERTIN**

préparée au sein du **Laboratoire d'Electronique et des Technologies de l'Information**

dans l'École Doctorale de Physique

Développement de procédés de mesure spatialement résolue de la nano-topographie sur des distances centimétriques : application au polissage mécano-chimique

Thèse soutenue publiquement le **21 octobre 2013**,
devant le jury composé de :

M. Olivier BUISSON

Institut Néel, CNRS/Université Grenoble-Alpes

Président

M. Alain BOSSEBOEUF

Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS/Université Paris-Sud

Rapporteur

M. Hamid ZAIDI

Université de Poitiers

Rapporteur

M. Didier BOUVET

Centre de Micro et Nano Technologies CMi, EPFL

Membre

M. Peter DE WOLF

Bruker Nano Surfaces

Membre

M. Maurice RIVOIRE

STMicronics

Membre

M. Carlos BEITIA

CEA-LETI

Membre

M. François BERTIN

CEA-LETI/Université Grenoble-Alpes

Membre

*Université Joseph Fourier / Université Pierre Mendès France /
Université Stendhal / Université de Savoie / Grenoble INP*



La seule chose que j'ai apprise, c'est l'étendue de mon ignorance.

J'espère ne jamais l'oublier...

Remerciements

Je remercie Graeme Wyborn de m'avoir accueilli au sein de l'area BEOL R&D de STMicroelectronics Crolles 300.

Je remercie Olivier Hinsinger de m'avoir permis d'intégrer l'équipe CMP R&D et l'area BEOL R&D STMicroelectronics Crolles 300, d'avoir proposé un sujet de thèse intéressant et prometteur, pour ses conseils, encouragements et idées à l'origine d'une grande partie de la thèse.

Je remercie Sébastien Gaillard pour son accueil au sein de l'équipe CMP R&D STMicroelectronics Crolles 300, pour sa pédagogie, son implication, ses encouragements, ses conseils avisés et constructifs, pour beaucoup de choses sans lesquelles cette thèse ne serait pas ce qu'elle est.

Je remercie Chrystel Deguet pour son accueil au sein du service Surfaces et Interfaces du LETI.

Je remercie Véronique Carron de m'avoir accueilli au sein du laboratoire « journée SSURF » du LETI, pour sa gentillesse, sa disponibilité, son implication et ses conseils.

Je remercie Frédéric (X) Gaillard de m'avoir encadré durant le début de ma thèse, de m'avoir mis sur les bons rails, pour sa disponibilité et sa présence durant ces trois années, mais aussi pour ses conseils et points de vue originaux, rafraichissants et percutants (et aussi pour ses coups d'épaule au jorky...).

Je remercie Carlos Beitia de m'avoir encadré durant ma thèse, pour sa bonne humeur, son optimisme et son recul vis-à-vis des résultats qui m'ont souvent permis de relativiser et de me remotiver. Je le remercie également pour ses encouragements et son implication dans les préparations des communications internes et externes.

Je remercie Maurice Rivoire de m'avoir encadré durant ces trois années, pour sa présence et son aide sans failles, pour ses encouragements et ses coups de pied au cul¹, et c'est souvent les coups de pied au cul qui sont les plus utiles, mais aussi et surtout pour toutes les choses scientifiques ou non scientifiques qu'il m'a si volontiers appris (je ne parle pas que de ses expressions).

Je remercie François Bertin de m'avoir dirigé durant ces trois années et tout particulièrement pour ses précieux conseils et le temps et l'énergie qu'il m'a consacré durant les mois de rédaction qui ont été extrêmement (← je n'avais pas envie de l'enlever celui-là !) enrichissants autant d'un point de vue scientifique que d'un point de vue rédactionnel.

Je remercie tous les membres des équipes CMP du LETI et de ST : Cathy, Elodie C, Elodie D, Laurence, Nathaly, Viorel, Aurélien, Daniel, Thomas, Fabien, Nicolas, Cédric, Manu, Olivier, Damien, Julian, Christophe, Denis, Romain, Jeff, Marc, Jean, Clément, Kévin, Sarah, Clémence, Seb et Maurice pour leur accueil chaleureux, leur soutien, leur aide, leurs conseils (notamment durant les nombreuses répétitions), leurs encouragements, pour toutes les choses qu'ils m'ont apprises et les bons moments qu'on a partagés.

Je remercie Yves Morand et Fabrice Nemouchi pour avoir toujours répondu à mes petites et grosses questions ou pour avoir toujours trouvé quelqu'un pour y répondre ; je les remercie également pour leurs encouragements et leurs précieux conseils lors des préparations des communications extérieures.

¹ Aucun électron n'a été enculé durant cette thèse.

² Ce transistor a été réalisé par John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley (prix Nobel de physique 1956) ; trois physiciens des laboratoires Bell (Etats-Unis). Ce premier transistor est le descendant de la diode inventée en

Je remercie Katia pour ses innombrables dépôts et également Maxime, Julie, Pierre, Sébastien, Florian (Métal ST) ; Véro, Daniel, Laurent, Catherine (Diél ST) ; Maryline, Christophe et Denis (AFM) ; Hélène (FRT) ; Sylvie, Patrick, Guillaume et Stéphane (SP1, SP2 et Surf-station) ; Cora, Sylvain et Alain (profilométrie mécanique et optique) ; Christophe (ellipsométrie) ; Karim (TT CEA), Laurent et Anne (Diél CEA) ; Jean-Michel ; Jessy (design structure) ; Nacer (Zygo DOPT) pour leur aide, leur expertise, leur gentillesse et leur disponibilité.

Je remercie Amal, François, Léa, Hervé, Ludovic et toutes les autres personnes que j'ai côtoyées durant ces trois années pour leur sympathie, leur bonne humeur, leurs encouragements et leurs conseils.

Je remercie toutes mes co-locatrices et tous mes co-locataires du bureau 346 ainsi que les squatteurs et squatteuses : Julien, Amélie, Mathieu, Cécile, Olivier, Emeline, Sander, Claire, Emilie, Richard, Thibaud, Sylvia, Edrisse et Laetitia pour leur agréable compagnie, les parties endiablées de TLMVSP, les jets de balle sauvages, les confections culinaires et les coups de main pour finir les restes, les pauses MIKADO ou autres, les déménagements et pendaisons de crémaillère, les road trips à Voiron ou à travers l'Amérique, pour quelques discussions scientifiques et surtout pour tous le reste... Je remercie également tous les « steak-frites-banane » ainsi que le cuistot de H3 qui vous demande la cuisson de votre steak mais qui s'en fout complètement !

Enfin, je remercie ma famille et ma compagne pour leur présence, leur soutien et leurs encouragements durant, entre autres, ces 8 dernières années.

RÉSUMÉ

Le polissage mécano-chimique (CMP) en raison de spécifications sévères, telles que l'aplanissement de la surface à ± 5 nm, est devenu un enjeu crucial pour le développement des nœuds technologiques 14 nm et au-delà. Les méthodes actuelles de caractérisation de la topographie, limitées en termes de taille de surface analysée, évaluent l'efficacité des procédés sur des structures nommées boîtes de mesure. Ces structures mesurent $100\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$ et sont situées entre les circuits intégrés. Elles sont donc non représentatives de la topographie de la puce et, de ce fait, des procédés de métrologie topographique de la puce sont requis. Dans un premier temps, nous montrons que la microscopie interférométrique est capable de caractériser la nano-topographie sur des distances centimétriques avec une résolution latérale micrométrique. La caractérisation par microscopie interférométrique de la nano-topographie induite par les procédés de CMP montre que les méthodes actuelles fournissent des valeurs topographiques non représentatives de la puce. Une méthodologie associée à ce nouveau type de caractérisation est proposée et discutée. Dans un deuxième temps, nous montrons que la diffusion de la lumière permet un contrôle rapide (trois minutes par plaques) et non destructif de variations nanométriques de la topographie de grilles de quelques dizaines de nanomètres de large sur toute la plaque.

Mots clés : polissage mécano-chimique, métrologie, topographie, puce.

ABSTRACT

Chemical Mechanical Polishing (CMP), because of narrower specifications, as surface planarization at ± 5 nm, is becoming a critical process for the development of the 14 nm technology node and beyond. Habitual topographic characterization techniques, limited in acquisition area, appraise processes efficiency through structures called test boxes. Those structures have a size equal to $100\text{ }\mu\text{m}$ by $50\text{ }\mu\text{m}$ and they are located, in the scribe lines, between the chips. Consequently, they are not representative of the die level topography and die level topographic metrology processes are required. In a first time, we show that interferometric microscopy is able to characterize nano-topography over centimetric distances with micrometric lateral resolution. Interferometric microscopy characterization of CMP processes induced nano-topography demonstrates that usual methods provide non representative die level topography values. A new characterization kind related methodology is proposed and discussed. In a second time, we show that diffused light measurement allows fast (three minutes/wafer) and non-destructive control of gate nano-topography variations for pattern widths of some tenths of nanometer.

Keywords: chemical mechanical polishing, metrology, topography, die.

Index des acronymes

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique

LETI : Laboratoire de l'Electronique et des Technologies de l'Information

MEMS : Micro Electro-Mechanical Systems

IRT : Institut de la Recherche Technologique

MOS : *Metal Oxide Semiconductor*

FET : Field Effect Transistor

CMOS : Complementary *Metal Oxide Semiconductor*

FEOL : Front-End-Of-Line

BEOL : Back-End-Of-Line

MEOL : Middle-End-Of-Line

CMP : Chemical Mechanical Polishing/Planarization

HRP : High Resolution Profilometer

AFM : Atomic Force Microscopy

CCD : Charge Coupled Device

PSI : Phase Shifting Interferometry

VSI : Vertical Scanning Interferometry

PFSM : Peak Fringe Scanning Microscopy

FSA : Five Sample adaptive nonlinear Algorithm

FRT : *Fries Research & Technology*

STI : Shallow Trench Isolation

PMD : Primary Metal Dielectric

RCWA : Rigorous Coupled Wave Analysis

BSSRDF : Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function

BRDF : Bidirectional Reflectance Distribution Function

DLS : Dual Light Scattering

POC : Poly Open CMP

MIST : Modeled Integrated Scattering Tool

NIST : National Institute of Standards and Technology

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Le polissage mécano-chimique et la métrologie.....	9
I. La fabrication de circuits intégrés	9
1.1 L'industrie microélectronique.....	9
1.2 Le transistor	11
1.3 Les procédés de fabrication de la microélectronique	12
II. Le polissage mécano-chimique	13
2.1 Principe, origine et équipement de polissage mécano-chimique	13
2.2 Les consommables et autres paramètres d'entrée du polissage mécano-chimique	19
2.3 Les paramètres de sortie du polissage mécano-chimique	22
2.4 Les modèles.....	24
III. La métrologie	29
3.1 Le rôle de la métrologie dans la microélectronique.....	29
3.2 Les procédés de métrologie du polissage mécano-chimique.....	32
3.3 Enjeu et intérêt de la thèse	43
Bibliographie.....	44
Chapitre 2 : Développement de la microscopie interférométrique pour la caractérisation de la nano-topographie sur des distances centimétriques : application au polissage mécano-chimique	49
I. Principe et intérêt de la technique	49
1.1 La microscopie interférométrique.....	49
1.2 Les modes de mesure	60
1.3 Intérêt de la technique	66
II. Conditions expérimentales	67
2.1 Description de l'équipement	67
2.2 Méthodologie	69
III. Résultats et discussion	72

3.1	Matériaux transparents et erreurs de mesure	73
3.2	Etude des contributions topographiques indésirables	76
3.3	Etude de la fiabilité de l'algorithme de recollement d'images	81
3.4	Développement d'une technique de référence	83
3.5	Evaluation de la justesse de la mesure	89
3.6	Mise à plat des données topographiques.....	92
3.7	Evaluation d'une méthodologie de mesure alternative	95
3.8	Etude du temps de la mesure	98
IV.	Conclusions.....	100
	Bibliographie.....	101
Chapitre 3 : Intérêts et méthodologie d'une caractérisation spatialement résolue de la nano-topographie sur des distances centimétriques : application au polissage mécano-chimique105		
I.	Etude de la représentativité, vis-à-vis de la nano-topographie du circuit intégré, des valeurs issues des boîtes de mesure	107
1.1	Description des procédés de CMP caractérisés.....	107
1.2	Le polissage des tranchées d'isolation peu profondes (CMP STI)	110
1.3	Le polissage du diélectrique pré métal (CMP PMD).....	111
1.4	Le polissage des contacts en tungstène (CMP contacts)	112
II.	Etude des zones marginales.....	113
2.1	Quantification du pourcentage et de l'amplitude des zones marginales et détection de leur localisation.....	113
2.2	Impact et origine des zones marginales	123
III.	Compléments de caractérisation de la nano-topographie du circuit intégré induite par les procédés de CMP.....	130
3.1	Discussion sur la courbe de distribution des hauteurs	130
3.2	Caractérisation de l'évolution de la topographie cumulée	133
IV.	Conclusions.....	137
Chapitre 4 : Etude de l'efficacité de la mesure de lumière diffusée pour le contrôle de la nano-topographie sur des distances centimétriques : application au polissage mécano-chimique141		
I.	Principe et intérêt de la technique	141
1.1	Introduction	141

1.2	La fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle	143
1.3	Modèles de fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle	146
1.4	Intérêt de la mesure de lumière diffusée	152
II.	Conditions expérimentales	153
2.1	Description de l'équipement	153
2.2	Description des plaques utilisées	157
2.3	Méthodologie	159
III.	Résultats et discussion	162
3.1	Choix d'un ensemble de paramètres de mesure	163
3.2	Etude de la sensibilité de la mesure de lumière diffusée à la densité de structures	163
3.3	Etude de la sensibilité de la mesure de lumière diffusée à la non-uniformité de polissage à l'échelle de la plaque	168
3.4	Etude de la sensibilité de la mesure de lumière diffusée à la nano-topographie de la grille.....	174
3.5	Etude de la mesure de lumière diffusée par simulation	179
IV.	Conclusions.....	187
	Bibliographie.....	188
	Conclusion générale et perspectives	193
	Annexe 1 : Mise à plat des données topographiques	199
	Annexe 2 : Programmes Matlab développés	207
	Valorisations scientifiques.....	211

Introduction générale

L'industrie microélectronique élabore des circuits intégrés ou puces microélectroniques. Aujourd'hui les enjeux sociétaux tels que les transports, la santé ou encore les technologies de l'information et de la communication (TIC) déterminent les axes de développement de la recherche technologique. La plupart des produits à haute valeur ajoutée intègrent des composants issus de l'industrie microélectronique. Cette industrie a intégré des ruptures technologiques importantes. En effet, le premier transistor², élément de base de l'industrie microélectronique, date seulement de 1947. Quelques années plus tard, en 1954, Texas instrument fabrique le premier transistor en germanium. En 1959 Jack Kilby et Robert Noyce, deux chercheurs américains, réalisent le premier circuit intégré composé de six transistors, en 1971 ce nombre passe à 2300 dans le processeur³ 4004 d'IntelTM. En effet, la diminution de la taille des transistors permet d'accroître la puissance du microprocesseur tout en diminuant sa consommation d'énergie et son coût. Une loi empirique, dite loi de Moore⁴, prédit que le nombre de transistors présents dans un microprocesseur double tous les 18 à 24 mois. Cette loi de tendance est encore respectée en 2013 avec la production de microprocesseurs dotés de plus d'un milliard de transistors.

² Ce transistor a été réalisé par John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley (prix Nobel de physique 1956) ; trois physiciens des laboratoires Bell (Etats-Unis). Ce premier transistor est le descendant de la diode inventée en 1903 par l'anglais John Alexandre Fleming. Il est plus léger, plus robuste et moins consommateur d'énergie que le tube à vide. Il permettait, entre autres, de détecter et d'amplifier les courants électriques.

³ Cette évolution fulgurante de la microélectronique est due aux sommes investies dans l'aérospatiale, au travers notamment du programme Apollo.

⁴ Cette loi fut prédite en 1975 par Gordon Earle Moore l'un des cofondateurs d'Intel.

Aujourd'hui, les efforts fournis en recherche et en développement se déploient selon trois axes : le « More Moore » qui vise à la diminution de la taille des transistors ; le « More than Moore » qui concerne l'augmentation des performances et des fonctionnalités du circuit intégré ; le « beyond CMOS » qui prépare les futures ruptures technologiques, telle que l'électronique moléculaire. De tels progrès technologiques requièrent l'introduction de nouveaux procédés de fabrication⁵.

STMicroelectronicsTM, partenaire industriel de cette thèse CIFRE, est une entreprise Franco-Italienne issue de la fusion entre SGS Microelettronica (compagnie italienne) et Thomson semi-conducteurs (compagnie française). STMicroelectronics emploie 50 000 personnes réparties sur douze sites à travers le monde dont 12 000 en recherche et en développement et génère un chiffre d'affaire de plus de six milliards d'euros (2012). Le centre principal de recherche et en développement de STMicroelectronicsTM se situe à Crolles (Isère, France). Il est composé de deux unités de fabrication (200 mm et 300 mm) et regroupe plus de 4 000 employés. La situation géographique de cette antenne stratégique de la société a été choisie en raison de sa proximité de la ville de Grenoble⁶.

Le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives de Grenoble (CEA-Grenoble) et plus précisément le Laboratoire d'Electronique et des Technologies de l'Information (LETI) qui est rattaché au pôle de la Direction de la Recherche Technologique (DRT) du CEA Grenoble est le second partenaire de cette thèse CIFRE. Le LETI a été fondé en 1967 pour répondre à la demande en électronique et instrumentation nucléaire du CEA. Aujourd'hui son rôle est de faire le lien entre la recherche fondamentale et le monde industriel. Le LETI emploie 2 000 chercheurs dont 270 doctorants et 30 post doctorants. Il est impliqué dans 47 laboratoires

⁵ Ceci implique des investissements de plus en plus importants en recherche et en développement (plusieurs dizaines de millions d'euros par an à l'heure actuelle). Cette réalité économique a limité et limitera encore plus le nombre d'acteurs industriels du domaine de la microélectronique. En 2001, près de 130 compagnies développées leurs procédés de fabrication avec leurs propres unités de fabrication ; en 2013 il en reste seulement 10. Parmi les principaux il y a le numéro un IntelTM, Texas InstrumentsTM (Etats-Unis), SamsungTM, HynixTM (Corée du sud), ToshibaTM, Renesas technologyTM (Japon) et STMicroelectronicsTM (France/Italie).

⁶ En effet, Crolles est située à 20 km de Grenoble qui est mondialement reconnue pour la qualité de sa main d'œuvre ouvrière spécialisée dans la ganterie depuis le 18^{ème} siècle. Cette proximité de Grenoble qui abrite le CEA LETI a ensuite permis un développement conjugué de ces deux entités.

communs avec des industriels et échange avec près de 360 partenaires industriels. Ce laboratoire est muni de huit plateformes (*Advanced CMOS 200 mm, Nanotech 300 mm, MEMS 200, Integrative Industries, Design, Integrative Chemistry & Biology, Photonics, Nanoscale Characterization*). Il possède un portefeuille de brevets conséquent et une expertise multidisciplinaire mondialement reconnue. Dans ce contexte, il s'avère être le partenaire idéal pour l'industriel STMicroelectronicsTM. Ainsi, depuis plusieurs années une collaboration fructueuse est à l'œuvre et a donné naissance à un pôle d'excellence en microélectronique et nanotechnologie dans le bassin Isérois structuré par le pôle de compétitivité MINALOGIC et par l'IRT Nanoélectronique. Cette thèse CIFRE s'inscrit dans cette collaboration.

L'élaboration de circuits intégrés de plus en plus performants nécessite des spécifications de plus en plus contraignantes. Dans le cas des procédés de polissage mécano-chimique il s'agit de contrôler, au nanomètre près, la topographie induite par le polissage. Actuellement le suivi des spécifications est principalement effectué par des mesures faites dans des structures dédiées, appelées « boîtes de mesure ». Il s'agit de structures de quelques centaines de micromètres de côté. Ces structures sont placées entre les puces dans des zones nommées « chemins de découpe ». De ces mesures, faites à différents endroits à travers la plaque, est extraite une information d'uniformité de polissage à l'échelle de la plaque. Or, comme illustré sur la Figure i-1, il s'avère que la caractérisation de la nano-topographie sur des distances centimétriques (d'un circuit intégré) n'est pas adressée dans l'industrie de la microélectronique.

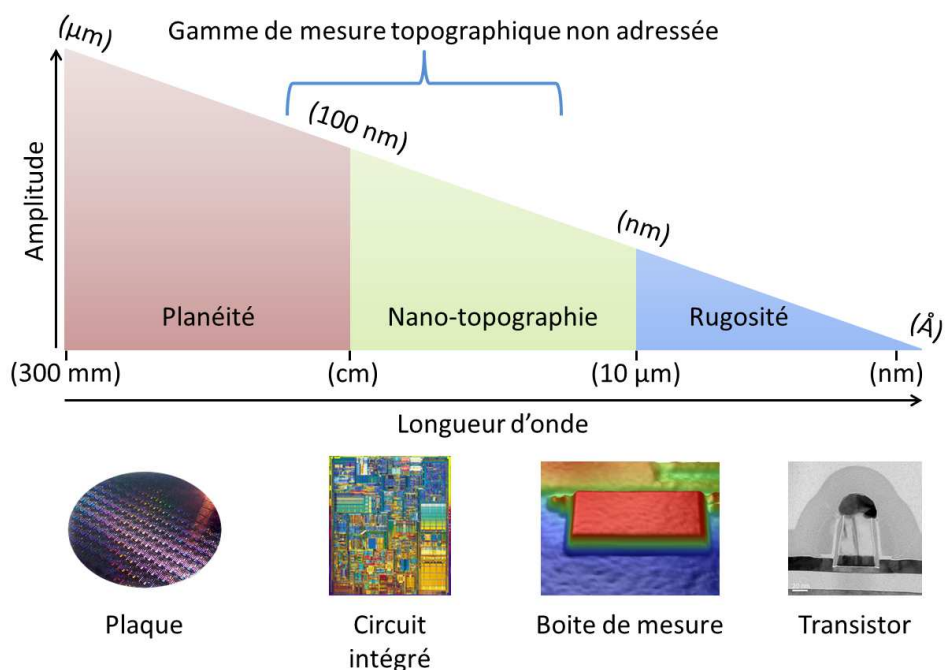


Figure i-1 : Représentation des longueurs d'onde et amplitudes des variations topographiques de l'industrie microélectronique.

Au cours de l'année 2010 STMicroelectronics et plus précisément l'atelier de recherche et de développement en Polissage Mécano-Chimique identifie ce manque comme critique pour les futurs nœuds technologiques. En effet, les mesures actuelles effectuées sur des structures dont la taille et la densité sont fixes, pourraient ne pas être représentatives de la topographie du circuit intégré qui présente une gamme importante de tailles et de densités de structures. Conscient de l'augmentation de la criticité des procédés de polissage mécano-chimique dans les années à venir, l'équipe CMP de recherche et de développement de Crolles juge que ce manque pourrait devenir critique. La caractérisation de la nano-topographie sur des distances centimétriques n'est pas, non plus, adressée par le monde académique et les équipementiers de l'industrie microélectronique. L'objectif de cette thèse CIFRE est de contribuer à apporter des solutions, en termes de métrologie, à cette problématique.

Le premier chapitre introduit de manière succincte la fabrication de circuits intégrés. L'industrie microélectronique et le rôle des différentes unités de fabrication sont présentés. Le transistor, dispositif élémentaire de l'industrie microélectronique, et les procédés de fabrication

permettant l'élaboration de circuits intégrés sont également introduits. Puis, le procédé de polissage mécano-chimique est présenté en détails. Enfin, le rôle de la métrologie dans l'industrie microélectronique est discuté. Les différents procédés de métrologie utilisés actuellement pour la caractérisation de la topographie induite par le procédé de polissage mécano-chimique sont décrits. En conclusion, la problématique et l'enjeu de la thèse sont discutés.

Le second chapitre est dédié au développement de la microscopie interférométrique pour la caractérisation de la nano-topographie, induite par les procédés de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques. La microscopie interférométrique et ses principaux modes de mesure sont présentés. L'intérêt de la technique est discuté. Dans la seconde partie, l'équipement et la méthodologie sont présentés. La troisième partie est consacrée aux différentes problématiques liées à l'utilisation de la microscopie interférométrique dans le cadre des applications visées. L'impact des erreurs de mesure provenant de la présence, sur la surface, de matériaux transparents est discuté. Une étude sur les contributions topographiques indésirables est menée. La fiabilité de l'algorithme de recollement d'images est étudiée. Le développement d'une technique de référence est présenté et la justesse de la mesure par microscopie interférométrique est évaluée. Une section est également consacrée à la présentation d'une nouvelle méthode de mise à plat des données topographiques. L'évaluation d'une méthode alternative de mesure, effectuée le cadre d'une collaboration avec l'équipementier NanometricsTM, initiée lors de cette thèse, est menée. Une discussion sur le temps de la mesure conclut le chapitre.

Le troisième chapitre met en avant les intérêts et la méthodologie d'une caractérisation spatialement résolue (3,6 μm) de la nano-topographie, induite par les procédés de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques. La représentativité, vis-à-vis de la topographie de la puce, des mesures historiques effectuées dans les boîtes de mesure, est étudiée. La méthodologie associée à la mesure de la nano-topographie d'un circuit intégré est présentée, détaillée et discutée. De nouvelles grandeurs, liées à ce nouveau type de

caractérisation, sont introduites et leurs pertinences sont montrées. Une discussion sur la topographie induite par les étapes de polissage est menée. Enfin, la topographie cumulée du circuit intégré est caractérisée après différents étapes de polissage mécano-chimique.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude de l'efficiencia de la mesure de lumière diffusée pour le contrôle de la nano-topographie, induite par les procédés de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques. La première partie introduit le principe de la mesure et la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle. La seconde partie est dédiée à la description de l'équipement et des échantillons utilisés. La méthodologie employée est ensuite détaillée. La troisième partie porte sur les résultats. La sensibilité de la mesure à la densité de structures, à la non uniformité de polissage à l'échelle de la plaque et à la nano-topographie des grilles est étudiée. Enfin, des résultats issus de simulations sont présentés.

Ce chapitre introduit de manière succincte la fabrication de circuits intégrés. L'industrie microélectronique et le rôle des différentes unités de fabrication sont présentés. Le transistor, dispositif élémentaire de l'industrie microélectronique, et les procédés de fabrication permettant l'élaboration de circuits intégrés sont également introduits. Puis, le procédé de polissage mécano-chimique est présenté en détails. Enfin, le rôle de la métrologie dans l'industrie microélectronique est discuté. Les différents procédés de métrologie utilisés actuellement pour la caractérisation de la topographie induite par le procédé de polissage mécano-chimique sont décrits. En conclusion, la problématique et l'enjeu de la thèse sont discutés.

Chapitre 1 : Le polissage mécano-chimique et la métrologie

I. La fabrication de circuits intégrés

1.1 L'industrie microélectronique

L'industrie microélectronique élabore des circuits intégrés ou puces microélectroniques. La fabrication de ces dispositifs nécessite trois unités de fabrication (Figure 1-1) équipées de salles blanches.

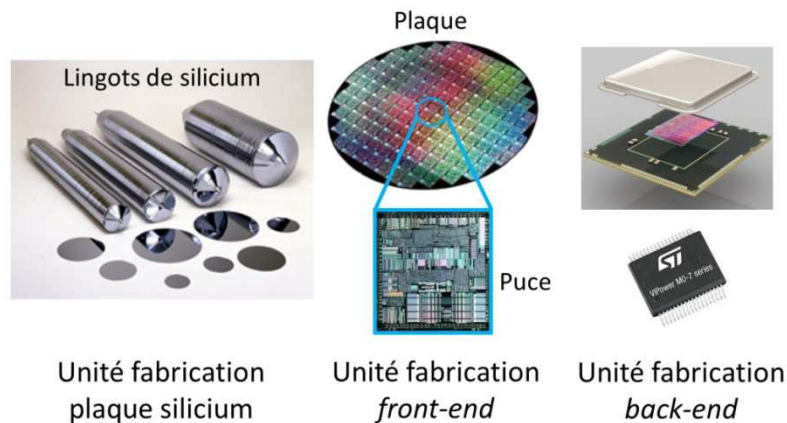


Figure 1-1 : Illustration du rôle des trois unités de fabrication de l'industrie microélectronique.

Le premier type d'unité de fabrication conçoit les plaques de silicium sur lesquelles les circuits intégrés seront élaborés. Le diamètre de ces plaques est actuellement, majoritairement, de 200 ou 300 millimètres. Leur épaisseur est comprise entre 0,7 et 0,8 micromètre. La taille des plaques de silicium a augmenté au cours des années et est encore amenée à évoluer vers 450 mm à l'horizon 2020. En effet, la fabrication de puces plus performantes (diminution de la

consommation d'énergie, augmentation de la fréquence de l'horloge interne) nécessite des investissements financiers importants (plusieurs dizaines de millions d'euros par an). Afin de rentabiliser les sommes investies, le diamètre des plaques évolue de manière à augmenter le nombre de puces par plaque ; +142% de puces par plaque pour le passage du 200 au 300 mm. Le changement de la taille des plaques implique des surcoûts importants liés aux équipements (+30%). Ils sont amortis par l'augmentation de la cadence de production par puce (+125%). Au final le coût de fabrication d'une puce baisse (-40%). Le choix du matériau, le silicium, utilisé pour la fabrication des plaques est également important. Ce dernier a principalement été choisi car il a la particularité de donner naturellement naissance à un oxyde (de silicium natif) présentant un taux de défauts d'interface et de volume très faible. De plus, il s'agit d'un matériau semi-conducteur qui peut être sous certaines conditions, soit isolant, soit conducteur. Enfin, les réserves naturelles de silicium sur terre sont importantes (17% de la masse de la terre). Il est le troisième élément le plus abondant après le fer et l'oxygène. La fabrication des plaques est effectuée à partir de sable (dioxyde de silicium). Il est réduit afin d'obtenir du silicium puis cristallisé sous forme de barreaux ou lingots de plusieurs dizaines de centimètres de long. Ces derniers sont ensuite sciés en tranches de moins d'un millimètre d'épaisseur. Après divers traitements (polissage, nettoyage) des plaques d'une grande pureté (99,99%) sont livrées à l'unité de fabrication des composants.

Il s'agit de l'unité de fabrication des puces microélectroniques aussi appelée unité de fabrication « *front-end* ». Dans cette dernière les dispositifs élémentaires de l'industrie microélectronique, les transistors, sont élaborés sur les plaques de silicium. Les interconnexions permettant de relier ces transistors sont également fabriquées dans cette unité de fabrication. Les plaques sont ensuite envoyées à l'unité de fabrication « *back-end* ».

Des tests de fiabilité des puces sont effectués dans cette unité de fabrication. Les plaques sont découpées afin de séparer les puces. Les interfaces matérielles et logicielles nécessaires à l'utilisation des puces sur les équipements de notre quotidien sont mises en place. Enfin, le produit fini est emballé et expédié aux clients.

Ce travail de thèse se situe au niveau d'une unité de fabrication *front-end*. Il est important de préciser que les aspects de l'industrie microélectronique détaillés dans ce manuscrit (comme par exemple l'utilisation de plaques de silicium) ne sont pas exhaustifs, bien au contraire. Ils permettent néanmoins de situer le contexte vis-à-vis de la thèse et de décrire les tendances actuelles et majoritaires du secteur.

1.2 Le transistor

Le transistor MOS pour Métal (grille), Oxyde (isolant), Semi-conducteur (source, drain et canal de conduction) est aujourd'hui le composant de base, le plus répandu, dans l'industrie de la microélectronique (Figure 1-2).

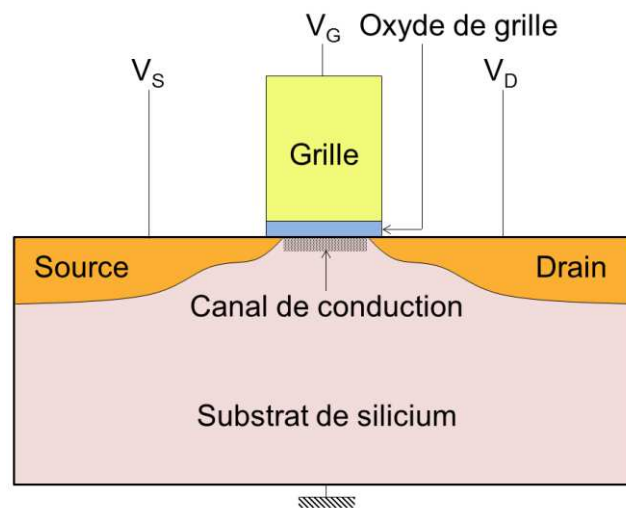


Figure 1-2 : Schéma d'un transistor Métal-Oxyde-Semiconducteur (MOS) à effet de champ.

Il est constitué de trois électrodes : la grille, la source et le drain et il est principalement utilisé pour assurer le rôle d'interrupteur. Le transistor MOS est un transistor à effet de champ (ou FET pour *Field Effect Transistor*). Il utilise un champ électrique pour contrôler le passage des électrons dans un canal semi-conducteur. Ce transport de charges s'effectue entre deux réservoirs, la source et le drain. La source fournit des porteurs et le drain les collecte. La tension V_G appliquée entre la grille du transistor et le substrat engendre un champ électrique qui sert à

moduler la densité des charges mobiles au sein du canal. La différence de potentiel appliquée entre la source et le drain, $V_D - V_S$, permet alors de mettre en mouvement ces charges. Le transistor MOS à effet de champ fait appel à un seul type de porteur de charge ; il s'agit d'un transistor unipolaire. La source et le drain sont des zones du substrat dopées afin de changer leur type de conduction.

Dans le cas d'un dopage de type n (excès d'électrons), la conduction s'effectue par des électrons ; c'est un transistor n-MOS. Dans le cas où la source et le drain sont dopés p (excès de trous), la conduction s'effectue par des trous ; il s'agit d'un transistor p-MOS. Dans un n-MOS le substrat est dopé p et dans un p-MOS le substrat est dopé n. Les deux types de transistors sont généralement associés au sein d'un même dispositif pour créer des fonctions logiques ; c'est la technologie CMOS pour *Complementary Metal Oxide Semiconductor*. Un circuit élémentaire, ou porte logique AND, OR, NAND et NOR, de traitement numérique d'une information binaire comporte très peu de transistors, en les interconnectant entre eux ils forment une fonction logique particulière. L'assemblage de ces circuits élémentaires constitue le circuit intégré.

1.3 Les procédés de fabrication de la microélectronique

Actuellement la fabrication d'un circuit intégré comporte plusieurs centaines d'étapes qui peuvent être classées en familles de procédés (Campbell 2001). Les principales sont :

- le dépôt qui apporte à la surface du substrat, différentes couche isolante ou conductrice ;
- l'épitaxie qui a pour but de faire croître du cristal sur du cristal ;
- le traitement thermique qui regroupe les étapes nécessitant une température élevée telles que les recuits ou certains dépôts ;
- la photolithographie qui par une succession d'étapes transfère une image présente sur un masque sur le substrat ;
- la gravure sèche qui permet le retrait de matériaux à l'aide d'un bombardement ionique généralement sous forme de plasma ;
- la gravure humide qui permet le retrait de matériaux à l'aide de solutions réactives ;

- l’implantation ionique dont le but est d’implanter les ions d’un matériau dans un solide ;
- le polissage mécano-chimique détaillé dans la suite de ce chapitre ;
- et la métrologie également détaillée dans la suite de ce chapitre.

La succession de ces différentes étapes dans un ordre particulier est généralement désignée par le terme d’intégration. Il peut en exister plusieurs, dépendantes du produit et du nœud technologique. Ce dernier est indiqué par un nombre qui correspond à la largeur minimale des grilles des transistors présents sur la puce. L’intégration est tronquée en deux parties principales désignées par les termes « *Front-End-Of-Line* » (FEOL) et « *Back-End-Of-Line* » (BEOL) à ne pas confondre avec les termes désignant les types d’unité de fabrication. Cette séparation est effectuée en raison des risques de contamination provenant des matériaux utilisés dans le BEOL. En conséquence, le parc équipement est divisé en deux parties. Le FEOL regroupe l’ensemble des étapes permettant l’élaboration des transistors à partir de la plaque de silicium vierge. Le BEOL suit le FEOL et regroupe l’ensemble des opérations nécessaires à la fabrication des interconnexions entre les transistors. Le BEOL commence après la réalisation des contacts sur la grille, la source et le drain et se termine par la création des plots utilisés pour établir une liaison électrique avec l’extérieur du circuit intégré. Du fait de l’augmentation du nombre d’étapes le « *Middle-End-Of-Line* » (MEOL) et le « *Far Back-End-Of-Line* » (Far BEOL) sont apparus ces dernières années. Il est également commun de découper une intégration en différentes briques. Ces dernières sont le plus souvent désignées par le nom de la structure dont elles permettent l’élaboration. Ainsi la brique « Grille » regroupe l’ensemble des étapes permettant l’élaboration des grilles des transistors.

II. Le polissage mécano-chimique

2.1 Principe, origine et équipement de polissage mécano-chimique

Le polissage mécano-chimique ou CMP, pour *Chemical Mechanical Polishing* est utilisé depuis plusieurs dizaines d’années pour le polissage des lentilles optiques et notamment la diminution de la rugosité. L’équation de Preston formulée en 1927 (et détaillée dans la suite de ce

chapitre), est la première modélisation empirique de ce procédé. Ce procédé a été introduit en microélectronique pour l'aplanissement de la topographie des niveaux d'interconnexions. Aujourd'hui, ce dernier est également désigné par la CMP pour *Chemical Mechanical Planarization*. Son apparition dans l'industrie microélectronique (Steigerwald, Murarka et al. 1997), (Li 2008) a lieu seulement à la fin des années 80 avec une certaine réticence. En effet, c'est le premier procédé à toucher mécaniquement la surface. De plus, les résidus de polissage correspondant à la matière enlevée sur la surface à polir inquiètent car ils sont plus grands que les transistors (de l'ordre du micromètre à l'époque). Les résidus de polissage pourraient donc rendre la puce défectueuse. Le besoin de procédés de polissage mécano-chimique est dû à l'augmentation de la densité de transistors qui nécessite, pour les relier, plus de niveaux d'interconnexions (neuf à l'heure actuelle). En l'absence d'aplanissement, la topographie de chaque niveau est transférée sur le niveau suivant ; après deux niveaux la topographie cumulée rend le dispositif inutilisable (Figure 1-3).

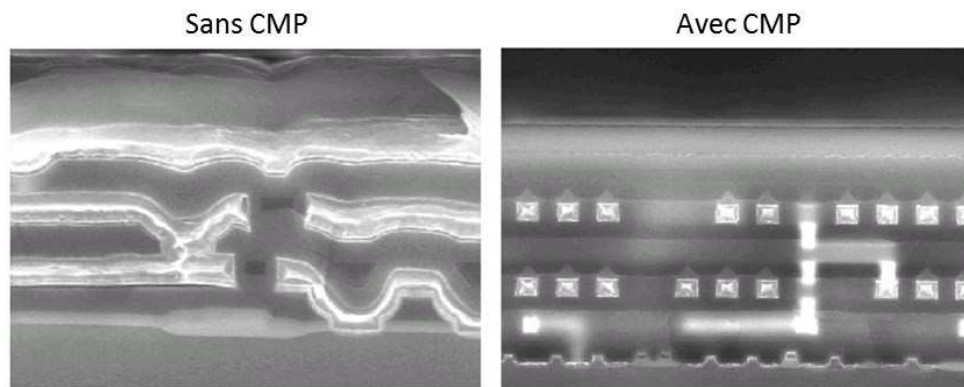


Figure 1-3 : Niveaux d'interconnexions sans et avec polissage mécano-chimique (Perrin 2000).

Le polissage mécano-chimique est devenu un procédé incontournable de l'industrie microélectronique. Son rôle principal est de fournir une planéité de surface suffisante pour les étapes de photolithographie. En effet, l'élaboration de structures sur une surface « résolue » nécessite que l'ensemble de cette surface soit contenu dans la zone de profondeur de champ (Figure 1-4). Dans le cas contraire les structures ne sont pas « résolues » et ne respectent pas les spécifications.

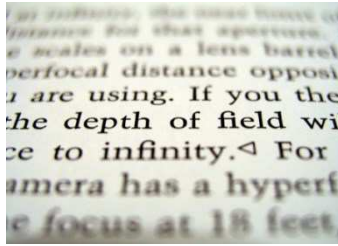


Figure 1-4 : Illustration du phénomène de profondeur de champ (Jeff 2006).

L'aplanissement peut être direct ou indirect.

La méthode directe (Figure 1-5) est généralement employée pour aplanir un matériau diélectrique, utilisé pour combler l'espace entre des motifs.

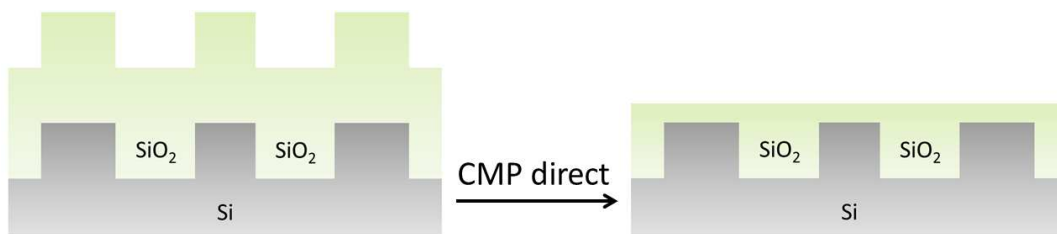


Figure 1-5 : Illustration d'un CMP direct.

La méthode indirecte (Figure 1-6) aussi appelée damascène « de Damas » est mise en œuvre en présence de matériaux difficiles à graver tels que certains métaux. Dans ce cas, des motifs sont gravés puis les espaces entre ces motifs sont remplis par le matériau que l'on souhaite structurer. L'aplanissement indirect intervient pour supprimer l'excès de matière. Le matériau poli apparaît incrusté d'où l'appellation damascène.

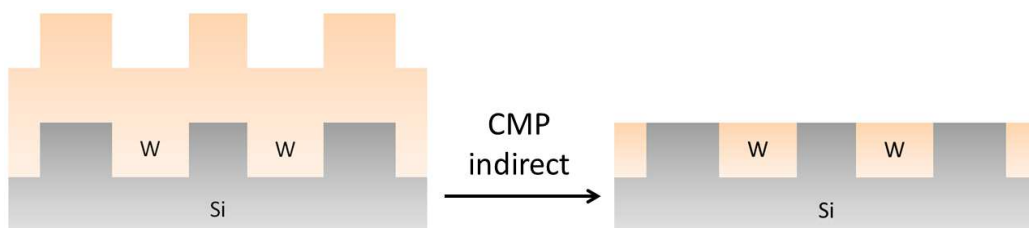


Figure 1-6 : Illustration d'un CMP indirect.

Le CMP procède par retrait de la matière. L'enlèvement de la matière se fait par la conjugaison d'une action chimique et d'une action mécanique. L'action chimique est assurée par une solution abrasive. Cette solution s'écoule entre la plaque et le tissu de polissage. L'action mécanique est due au tissu de polissage contre lequel la plaque est pressée. L'action mécanique provient également des particules abrasives contenues dans la solution.

Lors d'un procédé de CMP, un robot place la plaque à polir sur une tête de polissage. La tête de polissage presse la face avant de la plaque contre le tissu de polissage (Figure 1-7). Le plateau, sur lequel est collé le tissu, et la tête de polissage sont en rotation. Les rotations s'effectuent dans le même sens pour une raison d'uniformité de polissage. La tête de polissage accomplit également des balayages radiaux à travers le tissu, toujours pour une raison d'uniformité de polissage. La solution abrasive est répandue, à l'aide d'un bras, sur le tissu de polissage pendant le procédé.

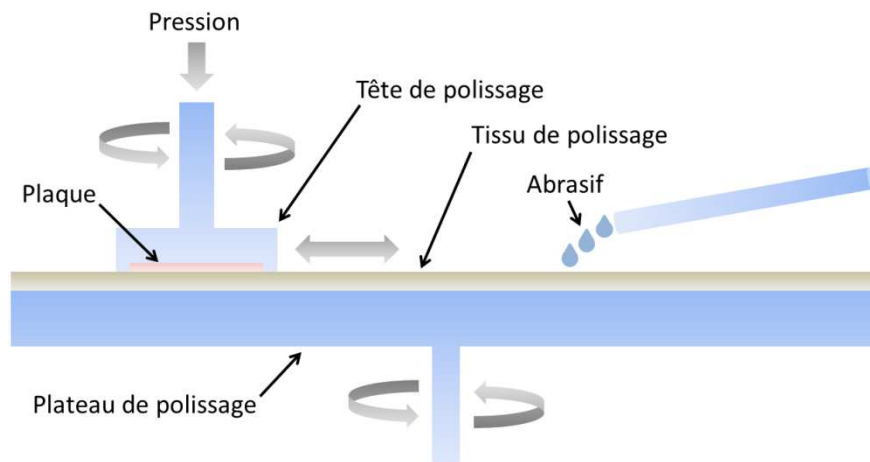


Figure 1-7 : Représentation d'une station de polissage.

La plaque est ensuite amenée vers une station de nettoyage incorporée à l'équipement. La station de nettoyage est constituée d'un bain chimique, de brosses et d'un dispositif de séchage par gaz neutres ou vapeurs d'alcools. Cette station de nettoyage a pour but de retirer les résidus

de polissage et de solution abrasive. La chimie utilisée dépend des matériaux présents sur la plaque. Le séchage permet d'éviter les marques de goutte d'eau.

Enfin, la plaque est déchargée. La plaque suit un parcours à sens unique ce qui permet d'augmenter la cadence de production.

Les équipements de CMP sont dotés de systèmes de détection de la « fin du polissage » ou « *End Point* ». Il en existe plusieurs basés sur des principes différents (Hocheng and Huang 2003). Les plus répandus utilisent :

- la température du tissu de polissage. Ce type de détection est essentiellement utilisé pour le polissage des métaux. En effet, le polissage des métaux présente un aspect chimique important ce qui donne lieu à des changements de température détectables ;
- la friction. Cette méthode se base sur la mesure du courant moteur du plateau de polissage. Ce type de détection est utilisé pour des CMP indirects. Le matériau poli et le matériau découvert à la fin du procédé doivent présenter une différence significative de comportement vis-à-vis des consommables afin de permettre la détection d'un changement du courant moteur ;
- l'électricité. Ce type de détection est utilisé pour le polissage des métaux et nécessite généralement la présence d'électrodes dans la tête ou le plateau de polissage. Ces électrodes permettent de mesurer des changements de conductivité, de capacité, d'impédance ou encore de résistivité. La mesure des courants de Foucault permet, par exemple, de connaître l'épaisseur restante de la couche de métal polie.
- la lumière. Cette méthode nécessite une fenêtre dans le tissu de polissage afin de permettre le passage de la lumière. La détection de la fin du polissage par la lumière est employée dans le cadre du polissage de matériaux transparents et utilise des principes variés tels que la réflectométrie⁷ ou la diffractométrie.

⁷ Ce principe est détaillé dans la section 3.2 de ce chapitre.

La détection de la « fin du polissage » fournit un point de repère concernant l'avancée du polissage.

Les équipements de CMP sont constitués de plusieurs stations de polissage. Ceci permet d'effectuer, sur une même machine, la totalité des étapes d'un procédé de CMP. Chacune des étapes d'un procédé de CMP a un rôle particulier et est effectuée sur une station de polissage différente. Ce sont les caractéristiques des consommables utilisés ainsi que les autres paramètres d'entrée du polissage qui différencient les étapes constituant le procédé de CMP. Quand elles sont judicieusement combinées, elles permettent d'obtenir un procédé de CMP optimal. Ainsi, dans le cas d'un polissage damascène, d'un métal, le procédé peut être séparé en trois étapes. La première a pour rôle d'aplanir la topographie du métal, la seconde de supprimer l'excès de métal et la dernière d'améliorer l'état de surface du métal (Figure 1-8).

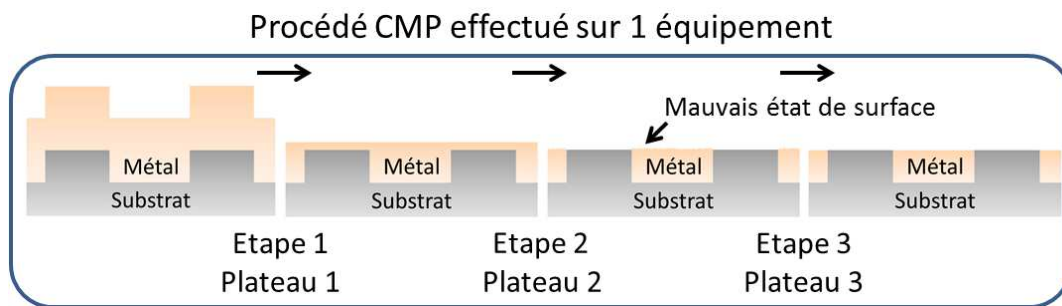


Figure 1-8 : Illustration d'un procédé de CMP damascène effectué sur un seul équipement. Le procédé de CMP est réalisé en plusieurs étapes, sur des plateaux de polissage différents et avec des paramètres d'entrée propres à chaque étape. La première étape aplanit, la seconde supprime l'excès de métal et la dernière améliore l'état de surface.

La pression appliquée durant le polissage et la présence, à travers la puce, de motifs de taille et de densité variables, induit un aplanissement de la surface non uniforme (Figure 1-9).

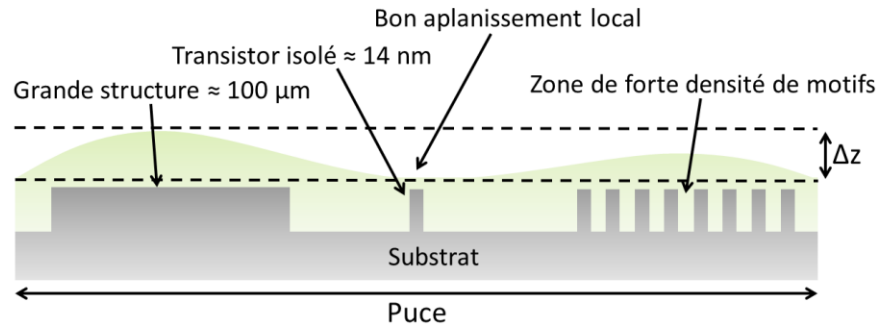


Figure 1-9 : Illustration de l'impact des variations de taille et de densité de motifs sur l'uniformité de l'aplanissement.

Comme illustré, un bon aplanissement local n'implique pas un bon aplanissement global.

2.2 Les consommables et autres paramètres d'entrée du polissage mécano-chimique

Les consommables jouent un rôle primordial dans le polissage mécano-chimique. Ils sont fabriqués par des entreprises spécialisées et présentent une importante diversité (Singh and Bajaj 2002), par conséquent la description qui en est faite n'est pas exhaustive.

Parmi les principaux, il y a le tissu de polissage. Ce dernier est en polyuréthane et peut être dur ou mou selon les applications. Son module d'Young est un paramètre important qui influence les performances du tissu en termes d'aplanissement local et global. Les tissus mous sont utilisés pour des étapes de finition afin de réduire la défektivité ou pour diminuer la rugosité de la surface. Les tissus durs, quant à eux, sont employés pour aplanir ou retirer de la matière. Ils sont, dans la plupart des cas, montés sur des tissus mous pour diminuer leur portée d'aplanissement dans le but de ne pas révéler les défauts de planéité de la plaque de silicium. Les tissus actuels durs ou mous présentent une structure poreuse (Figure 1-10). Le nombre, la taille et la distribution des pores sont importants. En effet, les pores transportent la solution abrasive jusqu'au centre de la plaque et ils évacuent également les produits du polissage. Il existe aussi des tissus à structure feutrée ou fibrée (Figure 1-10).

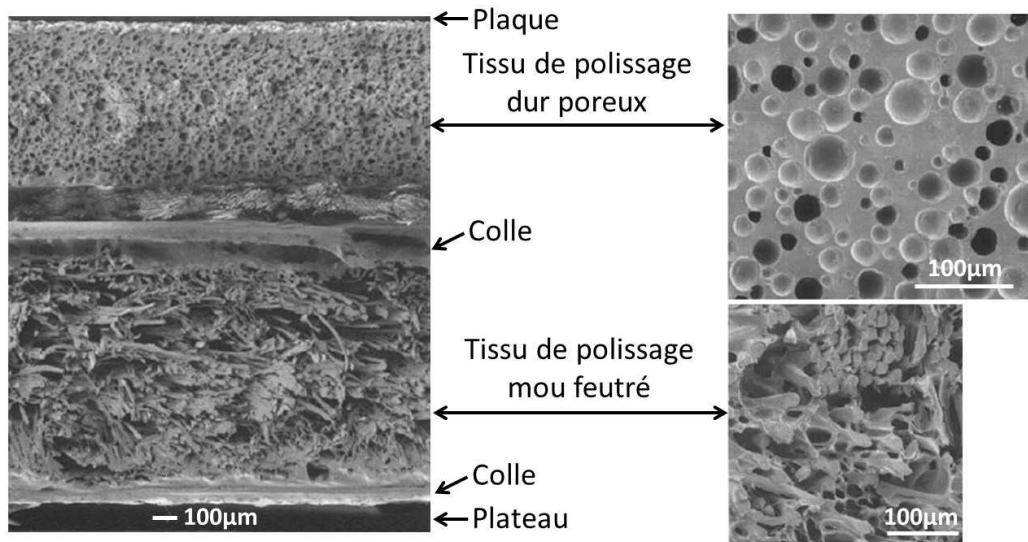


Figure 1-10 : Coupe MEB d'un tissu de polissage dur et poreux monté sur un tissu de polissage mou et feutré (Lu, Fookes et al. 2002).

Un autre consommable important, lié au tissu de polissage, est l'élément d'avivage du tissu. Il s'agit, soit d'un disque diamanté, soit d'une brosse. Son rôle est de régénérer la surface du tissu afin de maintenir ces propriétés constantes. Il assure une bonne reproductibilité du procédé durant toute la durée de vie du tissu de polissage. En production un tissu de polissage polit des milliers de plaques. L'avivage peut se faire durant le polissage ou après celui-ci. Le disque diamant (Figure 1-11-a) renouvelle la surface des tissus de polissage durs et poreux en détachant la partie supérieure du tissu. La brosse nettoie la partie supérieure des tissus mous et à structure feutrée.

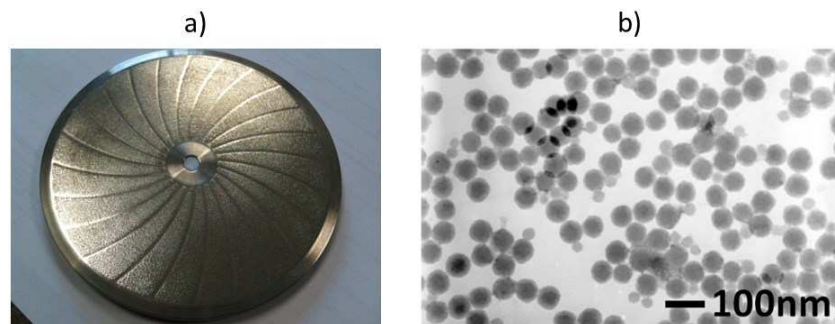


Figure 1-11 : a) Disque diamanté utilisé pour l'avivage du tissu de polissage. Disque inox avec diamants enchâssés, diamètre = 11 centimètres ; b) Image MET d'une solution abrasive contenant des billes de silice de 70 nm de diamètre (Perrin 2000).

La solution abrasive est constituée d'une solution chimique et de particules abrasives (Figure 1-11-b). Les particules abrasives assurent également l'aspect mécanique du CMP. Il en existe de différents matériaux. Le plus souvent il s'agit de dioxyde de silicium, de dioxyde de cérium ou d'oxyde d'aluminium. La taille de ces particules, de dix à quelques centaines de nanomètres, est un paramètre important. La forme, la distribution en taille, la dureté et la concentration des particules abrasives sont également essentiels. La solution chimique contient différentes espèces actives telles que des agents complexants, des inhibiteurs de corrosion, des oxydants, des régulateurs de pH, des agents chélatants et un solvant. Le pH, le point isoélectrique et la concentration des différents éléments énumérés précédemment sont aussi des paramètres d'entrée du CMP importants.

Le dernier consommable jouant un rôle important est la chimie utilisée durant le nettoyage des plaques. Il en existe plusieurs dont l'eau, l'hydroxyde d'ammonium, l'hydroxyde de tétraméthyl-ammonium, un mélange d'hydroxyde d'ammonium et de peroxyde d'hydrogène ou encore des chimies acides.

Les conditions expérimentales, ajustables à travers l'interface des équipements de polissage mécano-chimique, font également parties des paramètres d'entrée du CMP. Les principales sont la pression appliquée par la tête de polissage et les vitesses du plateau et de la tête de polissage. Le débit de solution abrasive, le débit d'eau, le type d'avivage et le temps de polissage sont également réglables.

Cette section montre que le nombre de paramètres d'entrée du CMP est considérable. De plus, ils sont la plupart du temps interdépendants. Ceci rend la compréhension des mécanismes mis en jeu très difficile. L'aspect mécanique est bien compris alors que le rôle des paramètres chimiques est mal connu. Ceci s'explique en partie par le fait que les consommables sont fabriqués par des entreprises spécialisées qui communiquent difficilement sur la formulation de leurs produits. En effet, les solutions abrasives, principales actrices de l'aspect chimique du polissage, occupent à l'heure actuelle, dans la catégorie consommable, le poste de dépense le

plus important de l'industrie microélectronique. Les enjeux économiques sont donc considérables ce qui limite la communication entre les différents acteurs.

2.3 Les paramètres de sortie du polissage mécano-chimique

Les paramètres de sortie permettent de caractériser l'efficacité du procédé de polissage mécano-chimique. Les plus utilisés sont :

- le taux d'enlèvement. Il indique l'épaisseur de couche retirée par unité de temps ;
- le coût d'aplanissement (Figure 1-12). Il correspond à la quantité de matière retirée nécessaire, pour aplanir la topographie ;

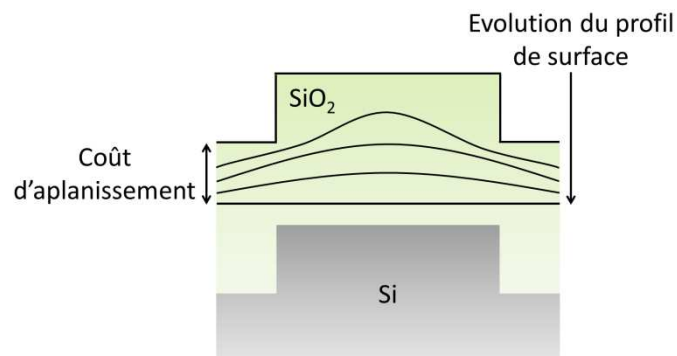


Figure 1-12 : Illustration du coût d'aplanissement et de l'évolution de la topographie de surface au cours d'un polissage mécano-chimique direct de SiO₂.

- la non-uniformité. Elle est égale à l'écart type de la distribution des hauteurs de la zone concernée. Elle quantifie l'homogénéité du polissage à travers généralement une plaque ou une puce ;
- la portée d'aplanissement. Elle caractérise la distance sur laquelle la topographie est aplanie ;
- la hauteur de marche.

Les défauts topologiques induits par le polissage mécano-chimique sont également des paramètres de sortie importants, il en existe quatre principaux qui sont :

- l'effet cuvette. Ce défaut se caractérise par l'apparition d'une topographie en forme de cuvette. Il est dû à la présence en surface de deux matériaux qui sont polis à des vitesses

inégales (aspect chimique). Le matériau qui présente une vitesse de polissage plus élevée est creusé. La forme particulière de ce défaut est d'origine mécanique (Figure 1-13) ;

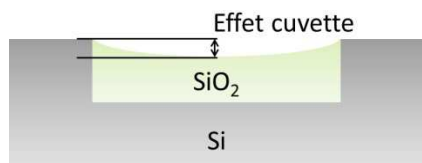


Figure 1-13 : Illustration de l'effet cuvette induit par le procédé de polissage mécano-chimique.

- l'érosion. Ce défaut est lié à l'effet cuvette. En présence d'effet cuvette dans un réseau dense, le tissu de polissage érode mécaniquement les zones en protrusion qui sont polies moins vite (Figure 1-14) ;

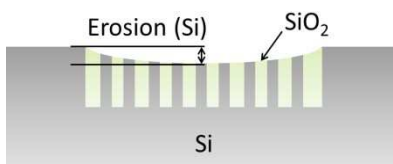


Figure 1-14 : Illustration du phénomène d'érosion induit par le procédé de polissage mécano-chimique.

- le renforcement. Il s'agit d'un défaut purement chimique. Les espèces réactives présentes dans la solution abrasive gravent sélectivement certaines zones et créent un renforcement (Figure 1-15) ;

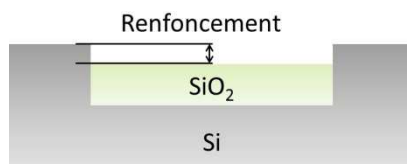


Figure 1-15 : Illustration du phénomène de renforcement induit par le procédé de polissage mécano-chimique.

- la corrosion ou oxydation involontaire des couches métalliques. Cette dernière conduit à une dégradation de la surface (Figure 1-16).

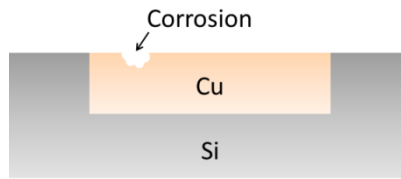


Figure 1-16 : Illustration du phénomène de corrosion induit par le procédé de polissage mécano-chimique.

Il existe également d'autres défauts induits par le polissage :

- la défektivité particulaire provenant d'une mauvaise évacuation ou nettoyage des déchets de polissage et des particules abrasives ;
- les rayures qui sont générées par les particules abrasives (Figure 1-17) ;

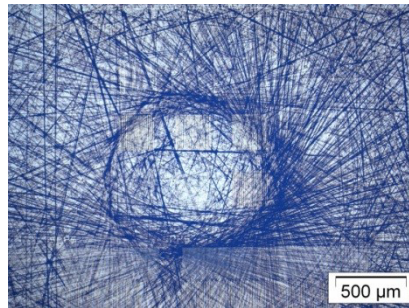


Figure 1-17 : Rayures observées par microscopie optique sur une couche d'aluminium après polissage.

- la rugosité de surface.

2.4 Les modèles

En raison du nombre important de paramètres d'entrée, pour la plupart interdépendants, du coût élevé de cette étape technologique et de la difficulté à obtenir les paramètres de sortie, la modélisation a très vite pris une place importante dans le domaine du polissage mécano-chimique. Il existe de nombreux modèles qui peuvent être classés en deux catégories. Les modèles généralistes permettent de décrire un comportement global. Les modèles spécifiques, quant à eux, s'intéressent à un type de polissage ou à une échelle particulière.

Le modèle de Preston

Parmi les modèles généralistes, le plus connu est sans aucun doute celui de Preston formulé en 1927 (Preston 1927). Il donne la relation entre la vitesse d'attaque (ou taux d'enlèvement de la matière) V_{attaque} , la pression moyenne de contact P , et la vitesse relative V (plaque / tissu de polissage) :

$$V_{\text{attaque}} = K_p P V \quad (1-1)$$

où K_p est une constante incluant tous les autres paramètres.

Cette équation simple est encore aujourd'hui énormément utilisée. Néanmoins, elle a été écrite pour décrire uniquement l'aspect mécanique du polissage, sans tenir compte de l'aspect chimique provenant de la solution abrasive. De plus, il s'agit d'une loi empirique, par conséquent elle ne permet pas d'expliquer le processus d'enlèvement de la matière.

Le modèle de Luo et Dornfeld

Luo et Dornfeld (Luo and Dornfeld 2001) considèrent un contact plastique entre les particules abrasives et la surface à polir et entre les particules abrasives et le tissu de polissage. Ils considèrent également une distribution normale de la taille des particules abrasives et une rugosité de la surface du tissu de polissage constante. A partir de ces hypothèses ils proposent le modèle suivant :

$$V_{\text{attaque}} = \rho N Vol_{\text{retiré}} \quad (1-2)$$

où ρ est la densité du matériau de surface, $Vol_{\text{retiré}}$ est le volume de matière retiré par une particule et N est le nombre de particules abrasives actives. Ils supposent que les particules abrasives s'indentent dans le tissu de polissage et sont maintenues. Cela se justifie par la comparaison des duretés du tissu de polissage, du matériau de surface et des particules abrasives. Ils aboutissent à une expression de la vitesse d'attaque de la forme :

$$V_{\text{attaque}} = C_1 \left[1 - \phi \left(3 - C_2 P^{1/6} \right) \right] P^{1/3} V \quad (1-3)$$

où ϕ est une fonction gaussienne et C_1 et C_2 sont des constantes qui intègrent les différents paramètres considérés, autres que P et V . Ce modèle, essentiellement utilisé dans le cadre du polissage du dioxyde de silicium, n'est pas applicable en absence de particules abrasives comme par exemple dans le cas du polissage du cuivre.

Le modèle de Fu et Chandra

Fu et Chandra proposent un modèle (Fu and Chandra 2003) dans lequel le tissu de polissage est considéré comme élastique et la loi d'enlèvement de la matière est de type Preston. Le tissu de polissage étant élastique, il se comporte comme un ressort, et donc :

$$P = Kh \quad (1-4)$$

où K est la constante de raideur du tissu de polissage et h la position suivant z .

Ils aboutissent à une expression exponentielle asymptotique de l'effet cuvette.

$$D(t) = D_{\max}(1 - e^{-Bt}) \quad (1-5)$$

où t est le temps de polissage, B est un facteur intégrant les propriétés élastiques du tissu de polissage et les coefficients de Preston des différents matériaux et D_{\max} est la valeur maximale de l'effet cuvette. Guo et Chandra (Gou, Chandra et al. 2004) ont légèrement modifié ce modèle en considérant le tissu de polissage comme viscoélastique. Ils aboutissent à des résultats similaires.

Parmi les modèles spécifiques, il y a entre autres ceux adressant une échelle particulière :

La modélisation de l'aplanissement à l'échelle des motifs

Des approches phénoménologiques, développées après l'introduction du polissage mécano-chimique dans le monde de la microélectronique, établissent des relations entre la taille des motifs et leur aplanissement. La méthode générale consiste à appliquer en chaque point de la surface un coefficient d'accélération ou de décélération de la vitesse d'attaque en fonction de la géométrie de la surface et de son environnement (Warnock 1991), (Burke 1991).

Les modèles qui découlent de cette méthode ne peuvent pas être utilisés pour modéliser l'aplanissement sur des distances centimétriques. En effet, leur validité est généralement démontrée sur un nombre réduit de motifs mais leur manque de fondements physiques ne permet pas leur généralisation à des circuits entiers (Ohta, Toda et al. 1999). Malgré de bonnes performances dans certains cas particuliers, ces modèles souffrent d'un manque d'exactitude, sans doute dû à la pauvreté de leur réalité physique (Takahashi, Tokunaga et al. 1997).

La modélisation de l'aplanissement à l'échelle de la puce

Au lieu de considérer un motif isolé ou un groupe de motifs, cette approche repose sur les densités de motifs présents sur la puce. Pour cela, un quadrillage échantillonne la surface de la puce. La densité de motifs est alors calculée dans chaque zone du quadrillage (Hayashide, Matsuar et al. 1995). Des relations phénoménologiques sont ensuite appliquées pour décrire l'aplanissement des diverses zones (Tseng, Yi et al. 1997), (Renteln 1996). Un contributeur important à ce type d'analyse est le laboratoire du MIT.

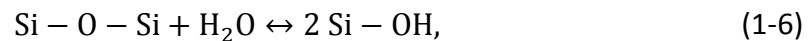
On peut également citer parmi les modèles spécifiques, ceux basés sur la nature du matériau à polir :

Le polissage du dioxyde de silicium

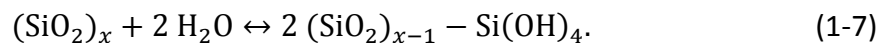
Le retrait du dioxyde de silicium est attribué par (Dunken 1991; Tomozawa 1997) à un apport de chaleur par friction et une hydratation de la surface. Ces deux phénomènes modifient les propriétés mécaniques du matériau et permettent son enlèvement ductile. De ce point de vue

l'aspect mécanique peut être considéré comme prépondérant. L'hydratation de la surface est assurée par deux réactions chimiques simultanées :

Une hydroxylation :

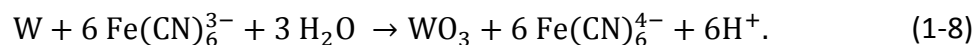


et une dépolymérisation :



Le polissage du tungstène

Pour le polissage du tungstène, l'aspect chimique est prépondérant. Les différentes espèces réactives présentes dans la solution abrasive conduisent à une oxydation/passivation de la surface. Kaufman et al. (Kaufman, Thompson et al. 1991) proposent le mécanisme suivant :



Cette réaction d'oxydation est auto limitée puisqu'elle s'arrête une fois que la couche de WO_3 atteint une certaine épaisseur. Dans ce contexte, l'oxydant joue également le rôle d'agent passivant. Le diagramme de Pourbaix⁸ montre que la formation de la couche de passivation (et donc le polissage) requiert un pH inférieur à quatre. Il est donc important de contrôler la valeur du pH de la solution abrasive.

On constate que la détermination des paramètres de sortie est largement adressée par la modélisation. Néanmoins, ces modèles sont la plupart du temps limités. Une autre façon d'accéder aux paramètres de sortie du polissage mécano-chimique est la métrologie.

⁸ Le diagramme de Pourbaix d'un élément permet, pour une température donnée, de représenter en fonction du pH et du potentiel, les domaines de prédominance et d'existence des différentes formes de l'élément considéré.

III. La métrologie

3.1 Le rôle de la métrologie dans la microélectronique

La métrologie est la science des mesures et de leurs applications. Elle permet d'améliorer la compréhension des phénomènes scientifiques. Cet aspect est en premier lieu apprécié par le monde de la recherche académique et celui de la recherche et du développement. La métrologie présente également un autre aspect moins évident mais tout aussi important. Ce dernier peut être illustré par une phrase de Lord Kelvin : « *If you cannot measure it, you cannot improve it* ». En d'autres termes, la métrologie permet l'introduction des concepts de contrôle de la qualité et d'évaluation de la conformité d'un produit vis-à-vis de spécifications définies au préalable. Cet aspect est très important aussi bien pour le consommateur que pour le producteur.

Longtemps considérée par l'industrie microélectronique comme un procédé sans valeur ajoutée, la métrologie est aujourd'hui totalement intégrée dans le processus de fabrication des puces et y occupe une place stratégique. En 2002, chaque dollar investi dans ce procédé générait un revenu de 11 dollars par circuit intégré vendu. En 2012, ce nombre avait subi une augmentation de 100% (Hutcheson 2013). Actuellement, près d'une étape sur trois est une étape de métrologie. Cette tendance est confirmée par l'introduction de nouveaux matériaux et de nouvelles structures qui requièrent des procédés de métrologie innovants. Notre capacité à contrôler est actuellement plus limitante que la physique des phénomènes impliqués (Mayberry 2013).

Dans le monde de la microélectronique la métrologie peut être « *in-line* » ou « *off-line* ».

La métrologie *in-line* regroupe l'ensemble des procédés qui ont lieu directement en production. Dans ce cas, les techniques utilisées doivent être rapides et non destructives. La métrologie *in-line* génère des valeurs qui doivent respecter des spécifications définies au préalable. Ainsi, si

une valeur dépasse d'une certaine quantité la limite haute ou basse spécifiée cela induit une alerte. Suite à cette alerte plusieurs actions peuvent être menées :

- une nouvelle mesure peut être faite (pour vérification) ;
- une étape de métrologie supplémentaire et complémentaire peut être envisagée afin de mieux identifier le problème ayant entraîné l'alerte ;
- la plaque peut être retravaillée de façon à respecter les spécifications ;
- la plaque peut être sortie de la ligne de production si elle n'est pas récupérable. Dans ce cas, la perte de la plaque a un coût.

La métrologie *in-line* rend aussi possible le suivi de certaines valeurs sur des durées et quantités de plaques importantes. De cette manière, il est possible de déterminer la fréquence des maintenances des équipements et la durée de vie, en temps et en nombre de plaques, des consommables. Cela peut également aider à détecter en avance de phase un problème qui se traduirait par une dérive des valeurs suivies. Enfin, certaines valeurs peuvent être utilisées pour adapter les paramètres d'entrée des procédés suivants.

La métrologie *off-line* regroupe les procédés qui ont lieu en dehors de la ligne de production car ils sont chronophages et destructifs. Ces procédés sont généralement utilisés, en amont, pour de la recherche et du développement ou dans des cas particuliers, tels que l'analyse de défaillance, pour lesquels les techniques *in-line* ne sont pas suffisantes. Dans ce dernier cas, le produit est sorti de la ligne de production et n'y retourne pas.

Comme pour les procédés de fabrication il existe plusieurs familles de procédés de métrologie. Ainsi, ils peuvent être de surface, de volume, physico-chimique, morphologique...

Pour qu'une valeur fournie par un procédé de métrologie soit pertinente, elle doit être accompagnée de la valeur de l'incertitude sur la mesure. L'incertitude sur la mesure provient des possibles erreurs de mesure et permet de juger du degré d'exactitude de la mesure. Les erreurs de mesure les plus courantes sont :

- l'erreur de justesse. Elle est égale à la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie et peut être évaluée à l'aide d'un étalon de mesure certifié. Cette quantité est nécessaire lors de la comparaison de valeurs issues de différentes techniques de caractérisation ;
- l'erreur de fidélité. Elle regroupe l'erreur de répétabilité et de reproductibilité. L'erreur de répétabilité permet de quantifier l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successives et effectuées dans les mêmes conditions. L'erreur de reproductibilité quant à elle est déterminée à partir de mesures dont les conditions varient. Dans notre cas, il s'agit de mesures effectuées par le même opérateur sur une période de temps étendue (1 mois). Soit $E_{\text{fidélité}}$ l'erreur de fidélité :

$$E_{\text{fidélité}} = E_{\text{répétabilité}} + E_{\text{reproductibilité}}. \quad (1-9)$$

Soit \bar{X} l'estimateur⁹ de la moyenne des mesures calculé à partir de n mesures :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n x_p. \quad (1-10)$$

L'équation (1-10) permet de calculer l'estimateur de l'écart type de la gaussienne formée par le résultat des mesures. Il est noté S et est égal à la racine carrée de l'estimateur de la variance corrigée, soit :

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{p=1}^n (x_p - \bar{X})^2} \quad (1-11)$$

où x_p est la valeur de la $p^{\text{ème}}$ mesure.

Si la distribution des points de mesure est gaussienne, l'incertitude type sur la mesure due à l'erreur de répétabilité ou à l'erreur de reproductibilité est calculée à partir de l'estimateur de l'écart type :

⁹ Le terme « estimateur » est utilisé en raison du nombre fini de mesures.

$$\Delta_i = t_{\alpha}^n S \quad (1-12)$$

où l'indice i représente soit la répétabilité soit la reproductibilité. La valeur de t_{α}^n dépend du nombre de mesures n et du niveau de confiance α , elle est donnée par la loi de Student¹⁰ (Gupta and Guttman). Pour plus de 100 mesures, la loi de Student est assimilable à une gaussienne et nous avons $\lim_{n \rightarrow \infty} t_{\alpha}^n = \sqrt{2} \text{erf}^{-1}(\alpha)$. Par exemple, on retrouve la valeur bien connue $t_{99,7}^{100} = 3$; dans ce cas la probabilité qu'une nouvelle mesure x_i soit comprise entre $x_i - \Delta_i$ et $x_i + \Delta_i$ est égale à 99,73%.

Les paramètres de sortie du polissage mécano-chimique sont aujourd'hui caractérisés à l'aide de différentes techniques détaillées dans la section suivante.

3.2 Les procédés de métrologie du polissage mécano-chimique

La microscopie optique

La microscopie optique (Murphy and Davidson 2013) a longtemps été le seul moyen de caractériser les procédés de polissage mécano-chimique. Elle permet de visualiser des objets ou des détails invisibles à l'œil à l'aide de deux lentilles convergentes, l'objectif et l'oculaire (Figure 1-18).

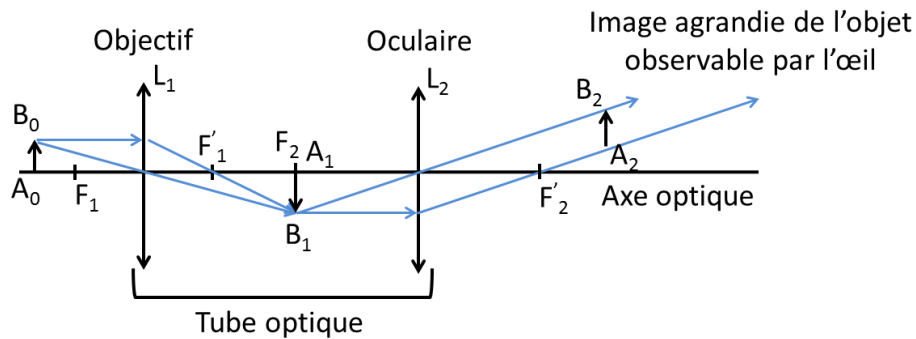


Figure 1-18 : Illustration du principe de la microscopie optique.

¹⁰ Les valeurs, t_{α}^n , sont solution de l'équation : $B\left[\frac{n}{n+(t_{\alpha}^n)^2}; \frac{n}{2}, \frac{1}{2}\right] = 1 + \alpha$ où $B(x; a, b) = \int_0^x y^{a-1} (1-y)^{b-1} dy$ est la fonction bêta incomplète.

L'objectif permet d'agrandir l'objet que l'on souhaite observer. Il en existe de plusieurs grossissements. L'oculaire, quant à lui, autorise l'observation de l'image agrandie par l'œil. Les positions relatives de l'objectif et de l'oculaire sont fixes. L'espace entre ces deux lentilles est appelé tube optique. L'utilisateur règle la position, sur l'axe optique, du système objectif-tube optique-oculaire à l'aide d'une molette de réglage. L'image agrandie de l'objet (A_2B_2) peut être observée quand l'objet (A_0B_0) est placé avant le foyer objet (F_1) de l'objectif et de telle sorte que son image réelle agrandie et inversée (A_1B_1) soit superposée avec le foyer objet de l'oculaire (F_2). De cette façon, l'image réelle agrandie et ré-inversée (A_2B_2) fournie par l'oculaire est observable à l'infini par l'œil.

Deux objets points sont résolus par le microscope optique quand ils sont séparés d'une distance minimale appelée résolution latérale du microscope. Cette dernière est limitée par la diffraction de la lumière sur les bords de l'ouverture de l'objectif. Un critère souvent retenu pour l'exprimer est le critère de Rayleigh. Il vaut dans le cas d'une illumination incohérente¹¹ et d'une ouverture circulaire :

$$r = 0,61 \frac{\lambda_0}{N.A.} \quad (1-13)$$

où λ_0 est la longueur d'onde dans le vide et $N.A.$ l'ouverture numérique ou angulaire qui détermine le plus grand angle de pente qui peut être mesuré sur la surface¹². Elle est égale à :

$$N.A. = n \sin \theta \quad (1-14)$$

où n est l'indice de réfraction du milieu séparant l'objectif et la surface et θ est l'angle d'acceptation de l'ouverture.

¹¹ La cohérence de la lumière est abordée au chapitre 2 section 1.1.

¹² Le facteur multiplicatif 0,61 correspond à la valeur de x pour laquelle la fonction $y = \left[\frac{2J_1(x)}{x} \right]^2$ présente son premier minimum, égal à 0. $J_1(x)$ est la fonction de Bessel d'indice 1.

La résolution latérale d'un microscope peut être améliorée en diminuant la longueur d'onde ou en augmentant l'ouverture numérique. L'ouverture numérique augmente avec n et $\sin\theta$. Dans l'air où n est égal à un, l'ouverture numérique maximale est généralement égale à 0,8. Elle est limitée par les aberrations géométriques apparaissant lorsque le diamètre de l'objectif est grand. Ainsi, dans le visible, la résolution latérale maximale d'un microscope optique est de l'ordre de 300 nm. La résolution latérale d'un microscope optique peut être augmentée à l'aide d'objectifs à immersion, n supérieur à un, ou en utilisant une source émettant dans l'ultra-violet.

La microscopie optique est utilisée pour détecter la présence de défauts induits par le procédé de CMP (Figure 1-19).

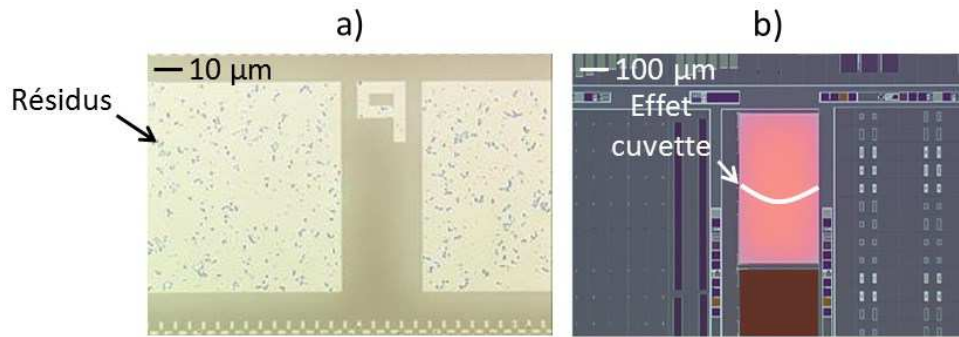


Figure 1-19 : Exemple d'observation par microscopie optique a) de résidus de polissage ; b) de l'effet cuvette.

Le microscope optique utilisé durant ce travail de thèse est un INS 3300 de la société LeicaTM. Il est équipé d'objectifs non immergés et il utilise une lumière blanche incohérente.

La réflectométrie

La réflectométrie consiste en la mesure, en fonction de la longueur d'onde λ et pour un angle d'incidence θ_0 , du coefficient de réflexion en intensité d'une surface plane. Le coefficient de réflexion en intensité est défini par la relation :

$$R(\theta_0, \lambda) = r(\theta_0, \lambda)r^*(\theta_0, \lambda) = I_r(\theta_0, \lambda)/I_i(\theta_0, \lambda) \quad (1-15)$$

où $I_r(\theta_0, \lambda)$ est l'intensité du faisceau réfléchi et $I_i(\theta_0, \lambda)$ est l'intensité du faisceau incident ; cette dernière est obtenue en mesurant l'intensité réfléchie par une surface possédant un coefficient de réflexion en intensité très proche de l'unité (en pratique des revêtements métalliques sont utilisés). Nous avons également noté r le coefficient de réflexion en intensité (aussi nommé coefficient de Fresnel). Ce coefficient est un nombre complexe, il s'établit en écrivant les équations de continuité de la composante parallèle à la surface du champ électrique (polarisation s) ou du champs magnétique (polarisation p). Dans le cas d'une interface plane séparant deux milieux d'indice complexe¹³ N_0 et N_1 nous avons :

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{N_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} = |r_s| e^{j\delta_s} \\ r_p &= \frac{N_1 \cos \theta_0 - N_0 \cos \theta_1}{N_1 \cos \theta_0 + N_0 \cos \theta_1} = |r_p| e^{j\delta_p}. \end{aligned} \quad (1-16)$$

L'angle de réfraction θ_1 est donné par la relation de Snell-Descartes $N_0 \sin \theta_0 = N_1 \sin \theta_1$. En présence de deux interfaces il est possible de montrer, en utilisant les notations de la Figure 1-20, que (Born and Wolf 1999) :

$$r = \frac{r_{01} + r_{12} e^{2j\varphi}}{1 + r_{01} r_{12} e^{2j\varphi}} \text{ avec } \varphi = \frac{2\pi N_1 h_1}{\lambda} \cos \theta_1 \quad (1-17)$$

où r , r_{01} et r_{12} sont les coefficients de réflexion pour la polarisation p ou s et h_1 est l'épaisseur de la couche d'indice N_1 .

¹³ L'indice de réfraction complexe est défini par $N = n - jk$ où n est l'indice de réfraction et k l'indice d'extinction.

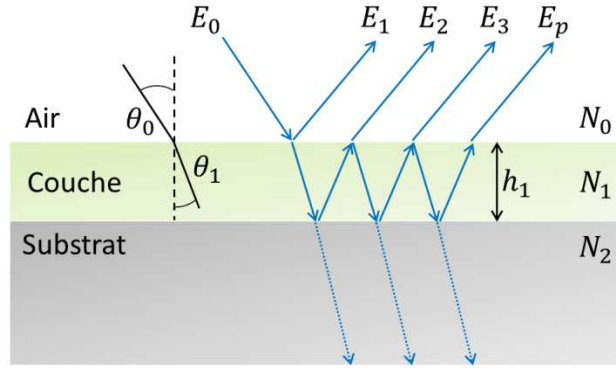


Figure 1-20 : Illustration du principe de la réflectométrie dans le cas de la mesure d'épaisseur d'une couche transparente sur un substrat transparent semi-infini.

Si tous les milieux sont transparents, les indices sont réels et le coefficient de réflexion en intensité s'écrit sous la forme suivante :

$$R = rr^* = \frac{(r_{01} - r_{12})^2 + 4r_{01}r_{12}\sin^2(\frac{\varphi}{2})}{(1 - r_{01}r_{12})^2 + 4r_{01}r_{12}\sin^2(\frac{\varphi}{2})}. \quad (1-18)$$

Lorsque φ varie, le coefficient de réflectivité oscille entre les valeurs :

$$\left(\frac{r_{01} - r_{12}}{1 - r_{01}r_{12}}\right)^2 \text{ et } \left(\frac{r_{01} + r_{12}}{1 + r_{01}r_{12}}\right)^2. \quad (1-19)$$

Les deux longueurs d'onde λ_i et λ_{i+1} correspondant à la position de deux maxima ou deux minima successifs sont liées par la relation :

$$\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_{i+1}} = \frac{1}{2N_1h_1 \cos \theta_1}. \quad (1-20)$$

Dans le cas général d'un système stratifié constitué de $M - 1$ couches homogènes et isotropes, le calcul des coefficients de réflexion r (pour une polarisation p ou s) peut s'effectuer en utilisant le schéma itératif suivant :

$$r_i = \frac{r_{i-1,i} + r_{i+1}e^{2j\varphi_i}}{1 + r_{i-1,i}r_{i+1}e^{2j\varphi_i}} : \varphi_i = \frac{2\pi N_i h_i}{\lambda} \cos \theta_i : i = M-1, \dots, 1 : r_M = r_{M-1,M} \quad (1-21)$$

où $r_{i,i+1}$ est le coefficient de Fresnel à l'interface séparant les milieux i et $i+1$ et où h_i et N_i sont respectivement l'épaisseur et l'indice optique de la $i^{\text{ème}}$ couche. L'angle θ_i est donné par l'invariant de Descartes $N_0 \sin \theta_0 = N_1 \sin \theta_1$ où θ_0 est l'angle d'incidence. N_0 et N_M sont respectivement l'indice du milieu ambiant et l'indice du substrat.

En pratique, l'angle d'incidence θ_0 est proche de zéro¹⁴. Dans ces conditions, le coefficient de réflexion ne dépend que très peu de l'état de polarisation du faisceau incident soit, plus spécifiquement : $R_p(0, \lambda) = R_s(0, \lambda)$. On acquiert M mesures du coefficient de réflexion $R_{\text{exp}}(\lambda_{\min} + i(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/(M-1))$ avec $i = 0, \dots, M-1$ pour M longueurs d'onde régulièrement réparties entre λ_{\min} et λ_{\max} . L'extraction des épaisseurs des couches (ou leurs indices), s'effectue en comparant les coefficients de réflexion mesurés avec ceux calculés à l'aide de (1-21). Le modèle est décrit par un certain nombre N_{par} de paramètres α_i ajustés de sorte à minimiser, au sens des moindres carrés, un critère χ^2 relatif à l'écart entre les valeurs mesurées et modélisées. Le critère χ^2 s'écrit pour un nombre M de mesures¹⁵ :

$$\chi^2 = \frac{1}{M - N_{\text{par}}} \sum_{i=0}^{M-1} [R_{\text{exp}}(\lambda_i) - R_{\text{cal}}(\lambda_i)]^2. \quad (1-22)$$

La Figure 1-21-a montre un spectre simulé de la réflectivité d'une couche de silice de 800 nm d'épaisseur déposée sur un substrat de silicium. La Figure 1-21-b montre que l'indice optique de

¹⁴ Pour des raisons d'encombrement l'angle d'incidence ne peut pas être égal à 0°, en pratique cet angle est souvent fixé à 6°.

¹⁵ Si les M écarts $R_{\text{exp}}(\lambda_i) - R_{\text{cal}}(\lambda_i)$ obéissent à une loi normale $N(0,1)$, alors la variable aléatoire $z = \sum_{i=0}^{M-1} [R_{\text{exp}}(\lambda_i) - R_{\text{cal}}(\lambda_i)]^2$ obéit à loi de distribution dite du χ^2 de densité de probabilité égale à :

$$\left[\frac{1}{2^{\frac{M}{2}} \Gamma(\frac{M}{2})} \right] z^{\frac{M}{2}-1} e^{-\frac{z}{2}}.$$

la silice varie peu dans la bande spectrale s'étendant de 500 nm à 2 μm ; dans ces conditions, la relation (1-20) montre que l'interfrange, exprimée en nombre d'onde, du spectre de réflectivité est quasi constante.

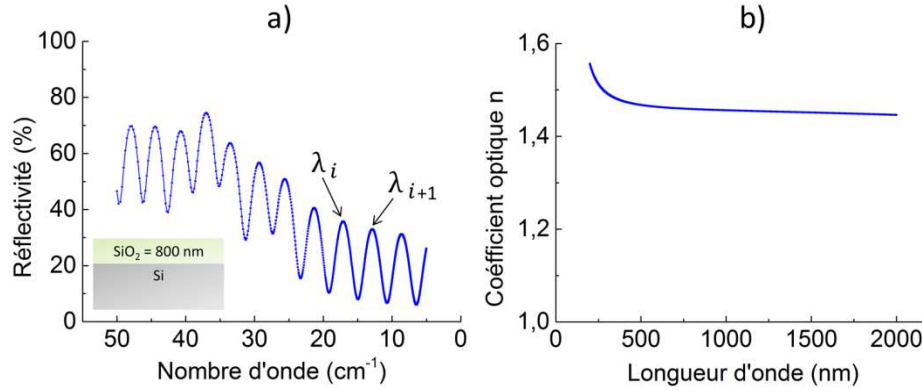


Figure 1-21 : a) Spectre simulé de la réflectivité d'une couche de silice de 800 nm d'épaisseur déposée sur un substrat de silicium ; b) loi d'indice d'une couche de silice de 800 nm.

Le réflectomètre utilisé durant ce travail de thèse est un NovaScan 3060 de la société « *Nova Measuring Instruments LtdTM* ». Il est équipé d'une lampe Xenon dont la gamme spectrale s'étend de 350 nm à 950 nm.

L'ellipsométrie

L'ellipsométrie est une technique optique d'analyse de matériaux basée sur la mesure du changement d'état de la polarisation de la lumière après réflexion sur une surface plane (Fujiwara 2007). Une onde électromagnétique, généralement polarisée linéairement, est après réflexion sur la surface transformée en une onde polarisée elliptiquement (Figure 1-22).

L'ellipsométrie consiste en la mesure du rapport suivant :

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\Psi) e^{j\Delta} \text{ avec } \tan(\Psi) = \left| \frac{r_p}{r_s} \right| \text{ et } \Delta = \delta_p - \delta_s. \quad (1-23)$$

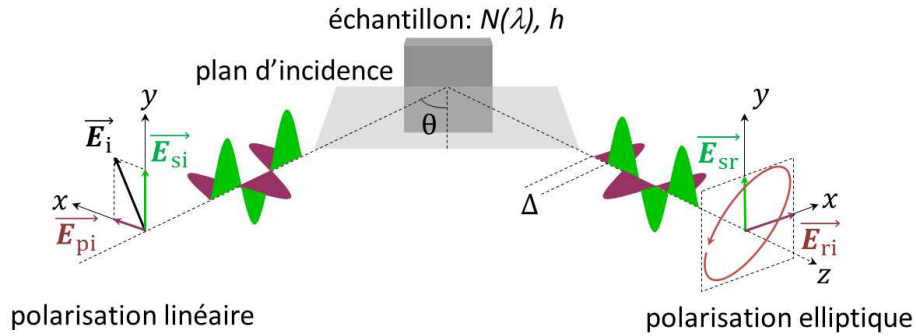


Figure 1-22 : Principe d'une mesure ellipsométrique. Pour une onde électromagnétique polarisée parallèlement ou perpendiculairement au plan d'incidence, les deux coefficients de réflexion (nombres complexes) sont notés respectivement r_p et r_s . En ellipsométrie classique ou dite « de Jones » on effectue la mesure du rapport r_p/r_s . Plus spécifiquement l'ellipsométrie spectroscopique à analyseur tournant mesure les deux quantités $\cos(\Delta)$ et $\tan(\Psi)$ en fonction de la longueur d'onde λ .

La Figure 1-23 montre les spectres simulés des angles ellipsométriques Ψ et Δ d'une couche de silice de 800 nm d'épaisseur déposée sur un substrat de silicium. La bande spectrale s'étend de 50 nm à 2 μm .

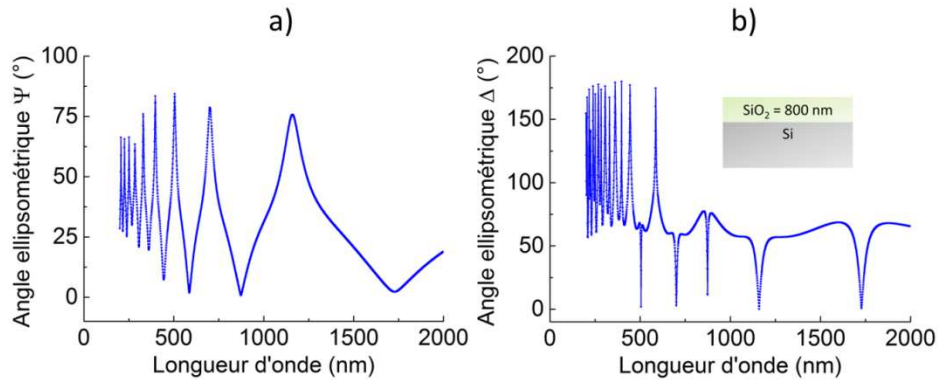


Figure 1-23 : a) Spectre simulé de l'angle ellipsométrique Ψ d'une couche de SiO_2 de 800 nm ; b) spectre simulé de l'angle ellipsométrique Δ d'une couche de SiO_2 de 800 nm.

Contrairement à la réflectivité, l'ellipsométrie mesure, pour chaque longueur d'onde λ_i , deux quantités¹⁶ $\{\tan[\Psi(\lambda_i)]; \Delta(\lambda_i)\}$ et ne nécessite pas la mesure de l'intensité du faisceau

¹⁶ Plus spécifiquement, un ellipsomètre à polariseur ou à analyseur tournant mesure le couple $\{\tan[\Psi(\lambda_i)]; \cos[\Delta(\lambda_i)]\}$. D'autres types d'ellipsomètre (à modulation de phase, à compensateur tournant) mesurent d'autres fonctions trigonométriques des angles ellipsométriques.

incident. L'ellipsométrie possède une extrême sensibilité à la couche de surface¹⁷. En pratique, on acquiert M couples $\{\tan[\Psi(\lambda_i)]; \Delta(\lambda_i)\}$ avec $i = 0, \dots, M - 1$ pour M longueurs d'onde régulièrement réparties entre λ_{\min} et λ_{\max} . L'extraction des épaisseurs des couches (ou leurs indices), s'effectue en comparant les angles ellipsométriques mesurés avec ceux calculés à l'aide des relations (1-16), (1-21) et (1-23). Le modèle est décrit par un certain nombre N_{par} de paramètres α_i ajustés de sorte à minimiser, au sens des moindres carrés, un critère χ^2 relatif à l'écart entre les valeurs mesurées et modélisées. Le critère χ^2 s'écrit pour un nombre M de mesures :

$$\chi^2 = \frac{1}{2M - N_{\text{par}}} \sum_{i=1}^M \left\{ \tan[\Psi_{\text{exp}}(\lambda_i)] - \tan[\Psi_{\text{cal}}(\lambda_i)] \right\}^2 + \left\{ \cos[\Delta_{\text{exp}}(\lambda_i)] - \cos[\Delta_{\text{cal}}(\lambda_i)] \right\}^2. \quad (1-24)$$

Deux ellipsomètres ont été utilisés durant ce travail de thèse :

- Un Aleris de l'équipementier KLA-TencorTM. Ce dernier est équipé d'une lampe Xénon + D₂ et couvre une gamme spectrale s'étendant de 150 nm à 900 nm. La taille du faisceau de mesure est égale à 40 µm de diamètre. Les mesures sont effectuées à un angle de 71° par rapport à la normale à la surface. Il s'agit d'un ellipsomètre à modulation équipé d'un polariseur tournant ;
- Un M-2000 DI de la société J.A. Woollam Co., Inc.TM. Il est équipé d'une lampe Halogène + D₂ qui couvre une gamme spectrale s'étendant de 193 nm à 1700 nm. La taille du faisceau de mesure est égale à 3 mm. La valeur de l'angle d'incidence peut être choisie dans un intervalle s'étendant de 45° à 90° par rapport à la normale à la surface. Il s'agit d'un ellipsomètre à modulation équipé d'un compensateur tournant.

Certains équipements de polissage mécano-chimique intègrent un réflectomètre ou un ellipsomètre.

¹⁷ Des épaisseurs inférieures à la monocouche peuvent être mesurées lors des premières étapes de croissance.

La profilométrie mécanique

La profilométrie mécanique ou profilométrie à contact est basée sur le contact physique entre une pointe et la surface à mesurer (Figure 1-24).

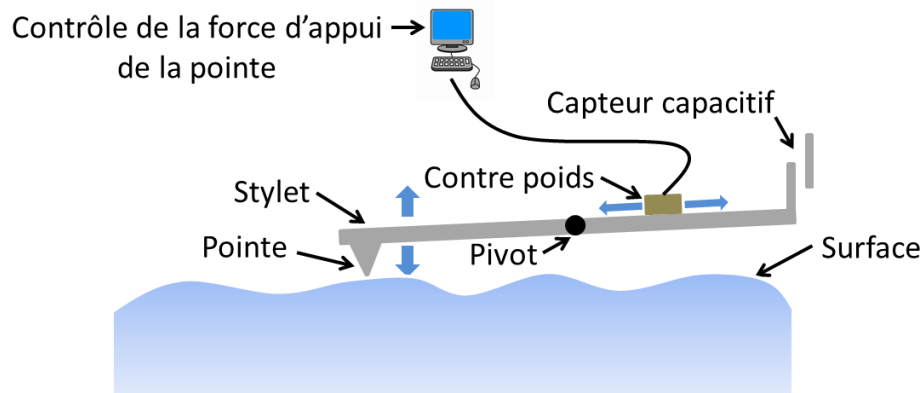


Figure 1-24 : Schéma de principe d'un profilomètre mécanique. Le contre poids permet un contrôle de la force d'appui de la pointe.

La pointe est positionnée au bout d'un levier aussi appelé stylet. Le côté opposé du stylet est contre balancé par un poids. Un moteur permet de rapprocher ou d'éloigner ce poids du pivot situé au centre du levier. Ce système fournit un contrôle de la force d'appui de la pointe de manière à ne pas endommager la surface quel que soit le matériau¹⁸. Un capteur mesure la position de la pointe, en z , lorsqu'on la déplace horizontalement sur la surface. Ce capteur peut être capacitif, à induction ou à réluctance variable. La plupart des mesures faites par profilométrie mécanique est effectuée en deux dimensions, néanmoins, l'acquisition de données en trois dimensions est possible par assemblage de plusieurs profils.

La pointe est généralement en diamant et son rayon de courbure varie de la dizaine de nanomètres à quelques micromètres. C'est le rayon de courbure de la pointe qui limite la résolution latérale de la profilométrie mécanique. Cette résolution spatiale dépend du couple de paramètres : vitesse de balayage et fréquence d'échantillonnage spatial. La résolution verticale est de l'ordre du nanomètre et l'amplitude de topographie mesurable est égale à 100 micromètres.

¹⁸ Ce type de spécification est fourni par l'équipementier.

Cette technique est utilisée dans des boîtes de mesure pour une mesure topographique directe. Elle est également parfois employée pour la caractérisation de structures spécifiques dont les dimensions n'excèdent pas quelques centaines de micromètres.

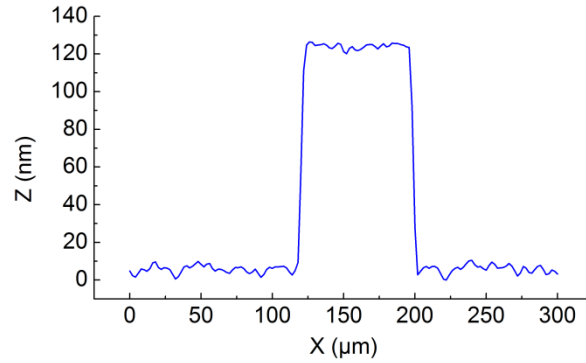


Figure 1-25 : Caractérisation par profilométrie mécanique de la topographie d'une boîte de mesure avant polissage mécano-chimique.

Le profilomètre mécanique utilisé durant ce travail de thèse est un HRP-340A de l'équipementier KLA-TencorTM. La force d'appui peut être choisie dans une gamme s'étendant de 0,05 mg à 50 mg. La fréquence d'échantillonnage spatial, réglable par l'utilisateur, est comprise entre 5 Hz et 2000 Hz. La vitesse de balayage couvre une gamme allant de 2 $\mu\text{m/s}$ à 25000 $\mu\text{m/s}$. Ainsi, la résolution latérale égale à l'inverse de la fréquence d'échantillonnage multipliée par la vitesse de balayage est comprise entre 1 nm et 5 mm. Ce profilomètre mécanique est équipé d'une pointe en diamant d'un rayon de courbure de 100 nm et présentant un angle conique de 100°. La résolution latérale peut donc être en réalité choisie dans une gamme allant de 100 nm à 5 mm. La position verticale de la pointe est mesurée à l'aide d'un capteur capacitif.

Les différentes techniques présentées durant cette section sont également utilisées pour caractériser l'uniformité de polissage à l'échelle de la plaque. Ceci est possible en répétant la mesure dans plusieurs circuits intégrés.

3.3 Enjeu et intérêt de la thèse

Les enjeux ayant motivés ce travail de thèse ont été présentés dans ce chapitre. En particulier, la miniaturisation des circuits intégrés conduit à une augmentation du nombre d'étapes de polissage mécano-chimique. Au début de l'année 2013, quarante étapes de CMP (toutes applications confondues) étaient recensées. La fabrication d'un circuit intégré en compte douze. A ceci s'ajoute, des spécifications de plus en plus sévères en termes d'aplanissement de la topographie (± 5 nm) et une augmentation du nombre et du type de matériaux polis (supérieur à quarante toutes applications confondues). Le développement du nœud technologique 14 nm et au-delà nécessite l'évaluation de l'efficacité des procédés de polissage mécano-chimique par la mise en œuvre d'outils métrologiques permettant la mesure de la nano-topographie induite par ces procédés.

Aujourd'hui, aucune technique ne permet l'obtention d'informations topographiques sur des motifs de taille et de densité variables à l'échelle du cm^2 . Dans ce contexte, ce travail de thèse a pour but de proposer des procédés de mesure spatialement résolue de la nano-topographie, induite par le procédé de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques. Ces procédés doivent être rapides et non destructifs, notamment sans contact avec la surface, afin d'être incorporable en production.

Bibliographie

- Aigouy, L., Y. de Wilde, et al. (2006). Les nouvelles microscopies, Belin.
- Born, M. and E. Wolf (1999). Principles of optics : electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Cambridge ; New York, Cambridge University Press.
- Burke, P. A. (1991). "Semi-empirical modelling of SiO₂ chemical-mechanical polishing planarization." VLSI Multilevel Interconnection Conference, 1991, Proceedings., Eighth International IEEE, 379-384.
- Campbell, S. A. (2001). The science and engineering of microelectronic fabrication. Oxford, Oxford University Press.
- Dunken, H. (1991). Surface-Chemistry of Optical-Glasses. Journal of Non-Crystalline Solids **129**(1-3): 64-75.
- Fu, G. H. and A. Chandra (2003). "An analytical dishing and step height reduction model for chemical mechanical planarization (CMP)." Ieee Transactions on Semiconductor Manufacturing **16**(3): 477-485.
- Fujiwara, H. (2007). Spectroscopic ellipsometry : principles and applications. Chichester, England ; Hoboken, NJ, John Wiley & Sons.
- Gou, Y. J., A. Chandra, et al. (2004). "Analytical dishing and step height reduction model for CMP with a viscoelastic pad." Journal of the Electrochemical Society **151**(9): G583-G589.
- Gupta, B. C. and I. Guttman Statistics and probability with applications for engineers and scientists.
- Hayashide, Y., M. Matsuar, et al. (1995). "A Novel Optimisation Method of CMP". 1995 CMP-MIC proceedings, 464-470.
- Hocheng, H. and Y. L. Huang (2003). "A comprehensive review of endpoint detection in chemical mechanical planarization for deep-submicron integrated circuits manufacturing." International Journal of Materials & Product Technology **18**(4-6): 469-486.
- Hutcheson, D. (2013). "The Value Add of Metrology for the Semiconductor Industry." 2013 International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics proceedings, 34-35.

- Jeff. (2006). La profondeur de champ. from <http://www.virusphoto.com/25-la-profondeur-de-champ.html>.
- Kaufman, F. B., D. B. Thompson, et al. (1991). "Chemical-Mechanical Polishing for Fabricating Patterned W Metal Features as Chip Interconnects." Journal of the Electrochemical Society **138**(11): 3460-3465.
- Li, Y. (2008). Microelectronic applications of chemical mechanical planarization. Hoboken, N.J., John Wiley.
- Lu, H., B. Fookes, et al. (2002). "Quantitative analysis of physical and chemical changes in CMP polyurethane pad surfaces." Materials Characterization **49**(1): 35-44.
- Luo, J. F. and D. A. Dornfeld (2001). "Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: Theory and modeling." Ieee Transactions on Semiconductor Manufacturing **14**(2): 112-133.
- Mayberry, M. (2013). "Pushing Beyond the Frontiers of Technology." 2013 International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics proceedings, 21-23.
- Murphy, D. B. and M. W. Davidson (2013). Fundamentals of light microscopy and electronic imaging. Hoboken, N.J., Wiley-Blackwell.
- Ohta, T., T. Toda, et al. (1999). "A practical CMP profile model for LSI design application." 1999 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices proceedings, 195-198.
- Perrin, E. (2000). Etude et modélisation de l'aplanissement par polissage mécano-chimique des diélectriques dans les interconnexions des circuits intégrés, Ecole centrale de Lyon.
- Preston, F. (1927). "The theory and design of plate glass polishing machine." Journal of the Society of Glass Technology **11**: 214-256.
- Renteln, P. (1996). "A Time-Based Topography Prediction Program for CMP." 1996 CMP-MIC proceedings, 217-223.
- Singh, R. K. and R. Bajaj (2002). "Advances in chemical-mechanical planarization." Mrs Bulletin **27**(10): 743-751.

- Steigerwald, J. M., S. P. Murarka, et al. (1997). Chemical mechanical planarization of microelectronic materials. New York, J. Wiley.
- Takahashi, H., K. Tokunaga, et al. (1997). "Modeling of chemical mechanical polishing process for three-dimensional simulation." 1997 Symposium on Vlsi Technology proceedings, 25-26.
- Tomozawa, M. (1997). "Oxide CMP mechanisms." Solid State Technology **40**(7): 169-175.
- Tseng, E., C. Yi, et al. (1997). "A Mechanical Model for DRAM Dielectric CMP Process." 1997 CMP-MIC proceedings, 258-265.
- Warnock, J. (1991). "A 2-Dimensional Process Model for Chemimechanical Polish Planarization." Journal of the Electrochemical Society **138**(8): 2398-2402.

Ce chapitre est dédié au développement de la microscopie interférométrique pour la caractérisation de la nano-topographie, induite par les procédés de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques. La microscopie interférométrique et ses principaux modes de mesure sont présentés. L'intérêt de la technique est discuté. Dans la seconde partie, l'équipement et la méthodologie sont présentés. La troisième partie est consacrée aux différentes problématiques liées à l'utilisation de la microscopie interférométrique dans le cadre des applications visées. L'impact des erreurs de mesure provenant de la présence, sur la surface, de matériaux transparents est discuté. Une étude sur les contributions topographiques indésirables est menée. La fiabilité de l'algorithme de recollement d'images est étudiée. Le développement d'une technique de référence est présenté et la justesse de la mesure par microscopie interférométrique est évaluée. Une section est également consacrée à la présentation d'une nouvelle méthode de mise à plat des données topographiques. L'évaluation d'une méthode alternative de mesure, effectuée le cadre d'une collaboration avec l'équipementier NanometricsTM, initiée lors de cette thèse, est menée. Une discussion sur le temps de la mesure conclut le chapitre.

Chapitre 2 : Développement de la microscopie interférométrique pour la caractérisation de la nano-topographie sur des distances centimétriques : application au polissage mécano-chimique

I. Principe et intérêt de la technique

1.1 La microscopie interférométrique

La microscopie interférométrique (Hariharan 1992; Born and Wolf 1999) combine les principes de la microscopie optique et de l'interférométrie pour accéder à l'information topographique de la surface à caractériser (Koliopoulos, Forbes et al. 1981). Comme un microscope classique, le dispositif présente un objectif « interférométrique » et un oculaire¹⁹. Différents champs de vue sont accessibles dépendant des grossissements de l'objectif et du sélectionneur de champ de vue. Le phénomène d'interférences lumineuses est équivalent au phénomène de diffraction. Ils sont tous les deux dus à la nature ondulatoire de la lumière. Le phénomène d'interférences a été observé pour la première fois en 1655 par l'italien Grimaldi, puis a été successivement investigué par Huygens et Newton. Ce n'est qu'au début du 19^{ème} siècle que l'anglais Thomas Young parvient à expliquer ce phénomène. En effet, la célèbre expérience des fentes d'Young lui a permis de mettre en évidence la nature ondulatoire de la lumière. Cette nature ondulatoire permet d'observer, sous certaines conditions, des interférences entre plusieurs ondes

¹⁹ Le principe de la microscopie optique est décrit chapitre 1 section 3.2.

lorsqu'elles se rencontrent. Ce travail de thèse est basé sur l'utilisation d'interférences à deux ondes dans l'air. En conséquence, la description théorique est consacrée à ce domaine particulier de l'interférométrie. Cette description théorique se place dans le cas où les deux ondes sont monochromatiques et de longueur d'onde équivalentes.

Soit deux ondes électromagnétiques planes représentées par leur champ électrique \vec{E}_1 et \vec{E}_2 . On note \vec{k}_1 et \vec{k}_2 leur vecteur d'onde, ω_1 et ω_2 leur pulsation et φ_{01} et φ_{02} leur phase à l'origine (Figure 2-1).

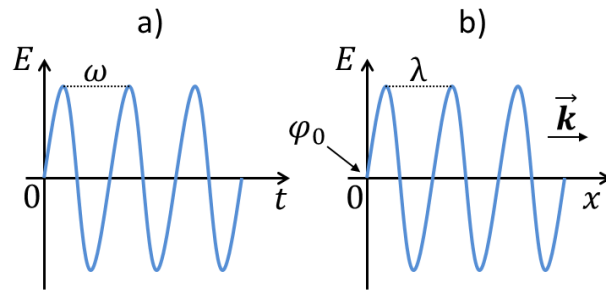


Figure 2-1 : Représentation du champ électrique \vec{E} a) dans le temps ; b) dans l'espace.

Les champs \vec{E}_1 et \vec{E}_2 polarisés respectivement suivant les directions \vec{e}_1 et \vec{e}_2 s'écrivent :

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = A_1(\vec{r}) \cos(\omega_1 t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \varphi_{01}) \vec{e}_1 \quad (2-1)$$

et

$$\vec{E}_2(\vec{r}, t) = A_2(\vec{r}) \cos(\omega_2 t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varphi_{02}) \vec{e}_2. \quad (2-2)$$

En tout point d'un milieu linéaire où les deux rayonnements coexistent, le champ électromagnétique résultant est égal à :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t). \quad (2-3)$$

L'observateur, œil ou détecteur, est sensible au carré du module du champ électromagnétique, soit $|\vec{E}(\vec{r}, t)|^2$. Cependant le champ oscille à une pulsation ω de l'ordre de quelques 10^{14} Hz que

l'œil et les détecteurs actuels ne peuvent pas « voir ». Il en découle que le signal observé est une moyenne statistique au cours du temps de $|\vec{E}(\vec{r}, t)|^2$, c'est-à-dire à un facteur près l'intensité (ou éclairement) :

$$I(\vec{r}, t) = \langle |\vec{E}(\vec{r}, t)|^2 \rangle_T \quad (2-4)$$

où :

$$\langle a(t) \rangle_T = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} a(t') dt'. \quad (2-5)$$

(2-4) devient :

$$I(\vec{r}, t) = \langle |\vec{E}_1(\vec{r}, t)|^2 \rangle_T + \langle |\vec{E}_2(\vec{r}, t)|^2 \rangle_T + 2\langle \vec{E}_1(\vec{r}, t) \cdot \vec{E}_2(\vec{r}, t) \rangle_T \quad (2-6)$$

où :

$$\langle |\vec{E}_1(\vec{r}, t)|^2 \rangle_T = \frac{A_1^2(\vec{r})}{2} = I_1, \quad (2-7)$$

$$\langle |\vec{E}_2(\vec{r}, t)|^2 \rangle_T = \frac{A_2^2(\vec{r})}{2} = I_2 \quad (2-8)$$

et

$$\begin{aligned} 2\langle \vec{E}_1(\vec{r}, t) \cdot \vec{E}_2(\vec{r}, t) \rangle &= A_1(\vec{r})A_2(\vec{r})\{\langle \cos[(\omega_2 - \omega_1)t - (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{r} + \varphi_{02} \\ &\quad - \varphi_{01}] \rangle_T \\ &\quad + \langle \cos[(\omega_2 + \omega_1)t - (\vec{k}_2 + \vec{k}_1) \cdot \vec{r} + \varphi_{02} + \varphi_{01}] \rangle_T\} \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2. \end{aligned} \quad (2-9)$$

Ce dernier terme représente le terme d'interférences des deux champs.

Il est nul si les deux ondes sont polarisées perpendiculairement : $\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 = 0$. Par conséquent l'observation d'interférences est possible uniquement lorsque $\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 \neq 0$, c'est la condition de **cohérence de polarisation**.

La valeur moyenne du cosinus en $\omega_2 + \omega_1$ est nulle sur tout $T \gg \frac{2\pi}{\omega_2 + \omega_1}$. Or les détecteurs actuels ont une période d'intégration bien supérieure à $\frac{2\pi}{\omega_2 + \omega_1}$. Le cosinus en $\omega_2 - \omega_1$, avec $\omega_2 \geq \omega_1 > 0$, a une valeur moyenne non nulle si $T \ll \frac{2\pi}{\omega_2 - \omega_1}$ soit $\nu_2 - \nu_1 \ll \frac{1}{T}$ où ν est la fréquence. Pour les détecteurs usuels, T est compris entre 10^{-6} s (pour un photomultiplicateur) et 0,1 s pour l'œil. Obtenir $\nu_2 - \nu_1 \ll \frac{1}{T}$, égal à 10 Hz dans ce dernier cas, signifie que la fréquence de la source (de l'ordre de 10^{14} Hz) doit être stabilisée à $10/10^{14} = 10^{-13}$ Hz ce qui est matériellement impossible sauf dans le cas d'une source unique pour les deux ondes. C'est la condition de **même source primaire**.

Un rayonnement est une succession de "trains d'ondes" qui n'ont pas de relation de phase entre eux, c'est à dire que les phases à l'origine φ_{0i} prennent des valeurs aléatoires d'un train d'ondes à l'autre (Figure 2-2).

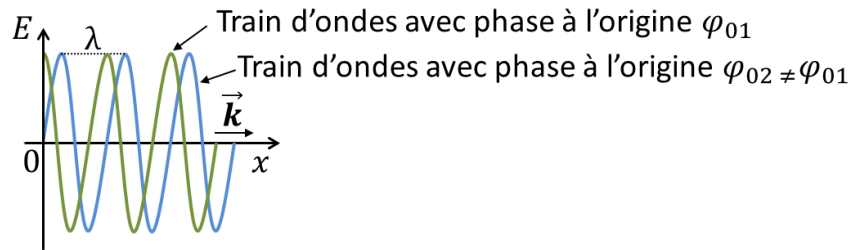


Figure 2-2 : Représentation de deux trains d'ondes présentant des phases à l'origine différentes.

Par conséquent, deux ondes interfèrent uniquement si elles sont issues du même train d'ondes. Soit τ_c la durée du train d'ondes et $l_c = c\tau_c$ sa longueur de cohérence temporelle dans le vide ou dans l'air. La condition de recouvrement de deux trains d'ondes s'écrit :

$$\varphi_2(\vec{r}) - \varphi_1(\vec{r}) = k\delta < \omega\tau_c = \frac{2\pi l_c}{\lambda} \quad (2-10)$$

où $\varphi_i(\vec{r}) = \vec{k}_i \cdot \vec{r} + \varphi_{0i}$, $\varphi_{02} - \varphi_{01} = 0$ et δ est la différence de chemin optique entre les deux ondes au point \vec{r} . On en déduit que :

$$\boxed{\delta < l_c}. \quad (2-11)$$

C'est la condition de **cohérence temporelle**.

L'absence d'interférences est également observée en présence d'une source étendue spatialement. Dans ce cas, les ondes provenant de différents endroits de la source, se comportent comme des sources ponctuelles et brouillent les interférences. La taille de la source doit donc être inférieure à la largeur de cohérence notée l_s . Cette grandeur est dépendante du montage interférométrique ; C'est la condition de **cohérence spatiale**.

Les conditions de cohérence sont supposées réunies et $\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 = 1$ ce qui conduit à :

$$\boxed{I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right)}. \quad (2-12)$$

Le phénomène d'interférences se manifeste par une alternance de zones sombres pour lesquelles $\cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) = -1$ et de zones brillantes pour lesquelles $\cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) = 1$. Deux franges brillantes ou sombres successives sont séparées par une différence de chemin optique égale à λ .

Michelson définit le contraste, aussi appelé visibilité par :

$$\boxed{\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}}. \quad (2-13)$$

où I_{\min} est l'intensité minimale et I_{\max} l'intensité maximale :

$$\begin{aligned} I_{\min} &= I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \\ I_{\max} &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}. \end{aligned} \quad (2-14)$$

Dans ce cas :

$$\gamma = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}, \quad (2-15)$$

et (2-12) peut être réécrite :

$$I = (I_1 + I_2) \left[1 + \gamma \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) \right]. \quad (2-16)$$

Le contraste maximum égal à un est obtenu pour $I_1 = I_2$, c'est à dire quand les deux ondes ont la même amplitude. Ainsi :

$$I = 2I_1 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right) \right] = 4I_1 \cos^2\left(\frac{\pi\delta}{\lambda}\right). \quad (2-17)$$

L'intensité varie entre $I_{\max} = 4I_1$ et $I_{\min} = 0$ (Figure 2-3).

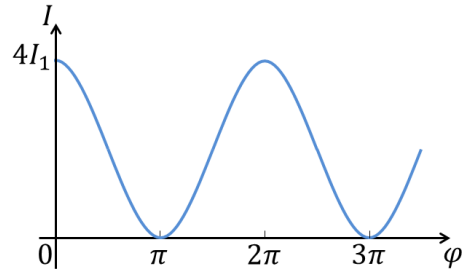


Figure 2-3 : Figure d'interférences de deux ondes d'intensité I_1 . Variation de l'intensité en fonction de la différence de phase entre les deux ondes.

Le montage interférométrique assure la division du faisceau en deux parties et la recombinaison de ces deux parties sur le détecteur. Il existe un grand nombre d'interféromètres qui peuvent être classés en deux catégories, les interféromètres à division du front d'onde et les interféromètres à division d'amplitude.

Les interféromètres à division du front d'onde "coupent mécaniquement ou spatialement" en deux le faisceau géométrique (Figure 2-4). Les fentes d'Young et les miroirs de Fresnel appartiennent à cette classe d'interféromètres.

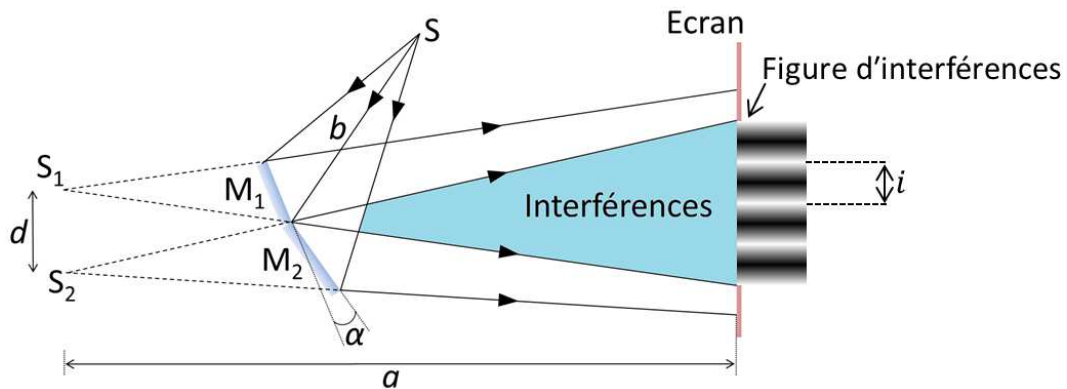


Figure 2-4 : Schéma de principe d'un interféromètre à division du front d'onde de type « miroirs de Fresnel ». Deux miroirs M_1 et M_2 inclinés l'un par rapport à l'autre d'un faible angle α , divisent le front d'onde créé par la source S . Les deux fronts d'onde issus des sources virtuelles S_1 et S_2 , distantes de d , interfèrent. La figure d'interférence est observable sur un écran. L'interfrange²⁰ noté i séparant deux franges d'intensité égale est égale à $a\lambda/2b \sin \alpha$.

²⁰ Une description détaillée des miroirs de Fresnel est disponible dans (Born and Wolf 1999) section 7.3.2.

L'interférométrie à division d'amplitude conserve le faisceau géométrique en entier mais partage en deux son énergie, donc l'amplitude du champ électrique. C'est ce type de montage interférométrique qui a été utilisé durant ce travail de thèse. Plus spécifiquement, un interféromètre de Michelson (Figure 2-5) et un interféromètre de Mirau (Figure 2-6) ont été utilisés.

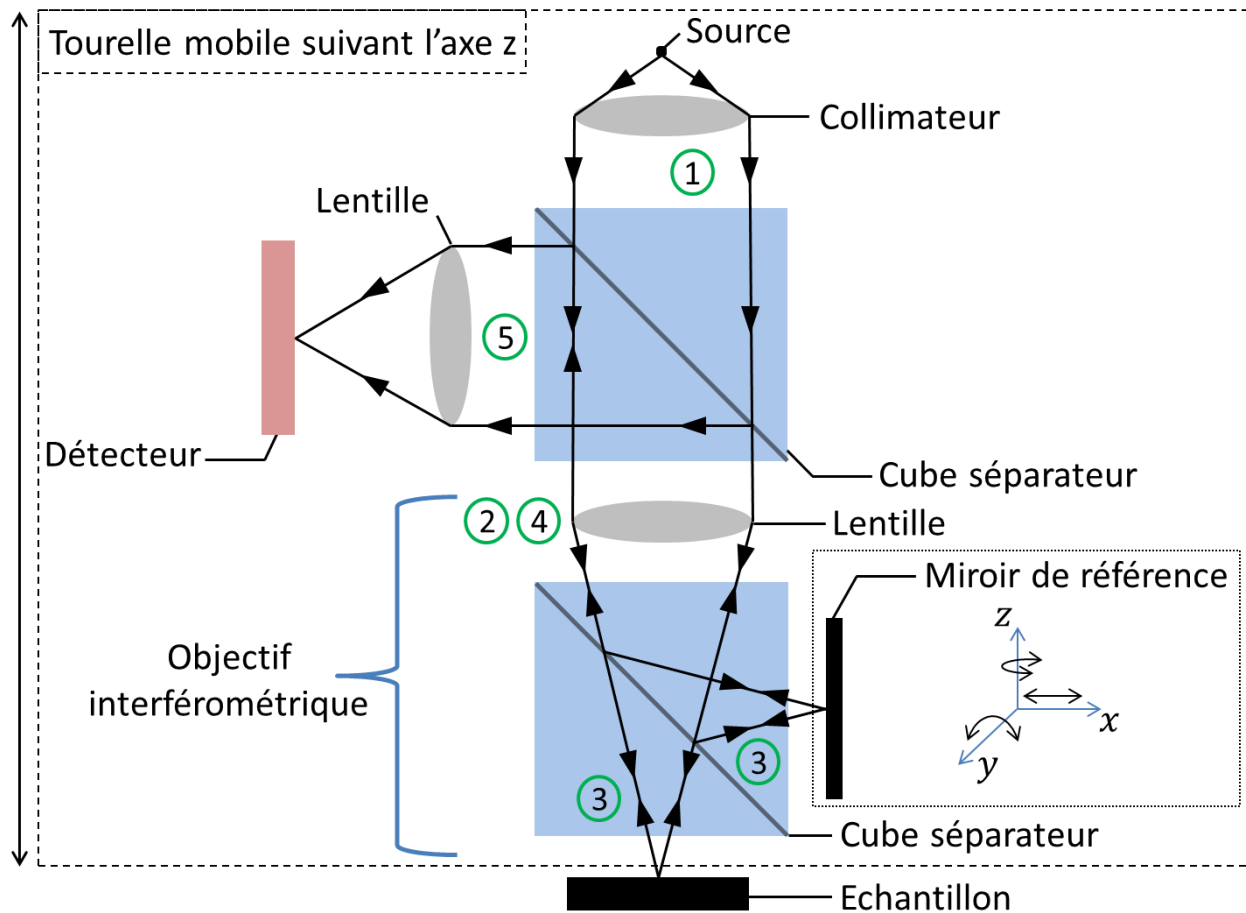


Figure 2-5 : Schéma de principe de l'interféromètre de Michelson dans un contexte de microscopie interférométrique. Interféromètre à division d'amplitude. Les numéros cerclés indiquent le parcours de la lumière. L'inclinaison du miroir de référence suivant les axes y et z est ajustable par l'utilisateur. La position de la tourelle suivant l'axe z est également réglable. Une mesure de topographie nécessite que ces trois paramètres soient ajustés de telle sorte que la différence de chemin optique soit nulle quelle que soit la position (x, y) sur l'échantillon. En fonction du mode de mesure, un déplacement de la tourelle suivant l'axe z ou un déplacement du miroir de référence suivant l'axe x est effectué durant la mesure.

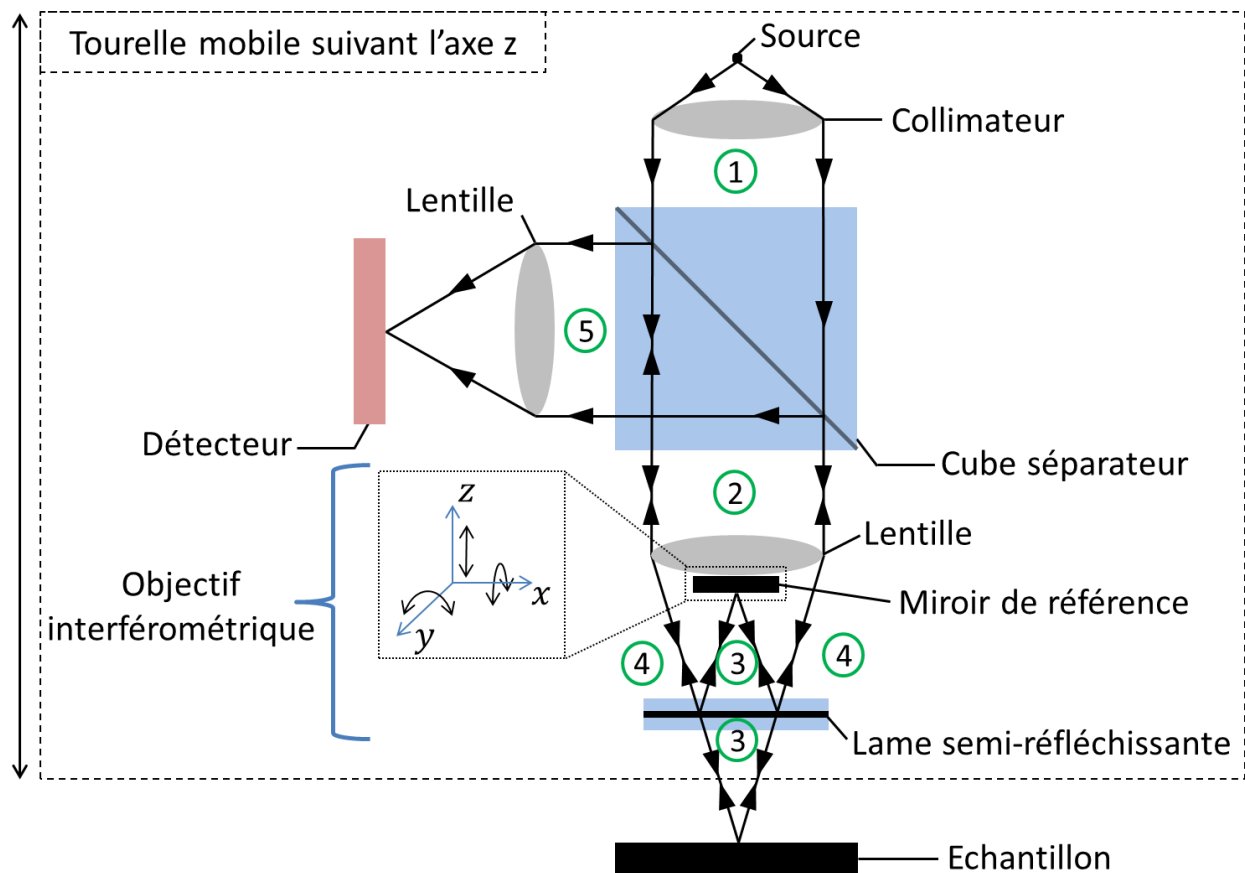


Figure 2-6 : Schéma de principe de l'interféromètre de Mirau dans un contexte de microscopie interférométrique. Interféromètre à division d'amplitude. Les numéros cerclés indiquent le parcours de la lumière. L'inclinaison du miroir de référence suivant les axes x et y est ajustable par l'utilisateur. La position de la tourelle suivant l'axe z est également réglable. Une mesure de topographie nécessite que ces trois paramètres soient ajustés de telle sorte que la différence de chemin optique soit nulle quelle que soit la position (x, y) sur l'échantillon. En fonction du mode de mesure, un déplacement de la tourelle ou un déplacement du miroir de référence suivant l'axe z est effectué durant la mesure.

Ces interféromètres sont composés d'une lame semi-réfléchissante ou d'un cube séparateur qui divise le faisceau en deux parties. L'une se réfléchit sur un miroir « de référence » et l'autre sur la surface de l'échantillon. Les deux faisceaux reviennent ensuite sur la lame semi-réfléchissante (ou le cube séparateur) qui les dirige vers le détecteur. Les deux faisceaux interfèrent et le détecteur permet de mesurer les variations d'intensité de la figure d'interférences. La connaissance des caractéristiques du montage interférométrique permet d'extraire la topographie de l'échantillon à partir de la figure d'interférences.

L'équation (2-17), valable pour les montages interférométriques de Michelson et de Mirau ($I_1 = I_2 = I_0$), devient :

$$I(x, y) = 2I_0\{1 + \cos[\varphi(x, y)]\} = 2I_0\left\{1 + \cos\left[\frac{2\pi\delta(x, y)}{\lambda}\right]\right\}. \quad (2-18)$$

L'intensité lumineuse, I_0 , des deux sources, est considérée uniforme dans l'espace.

La taille du champ de vue et la résolution latérale souhaitée par l'utilisateur, dépendantes de l'application visée, restreignent le choix de l'interféromètre. Une taille de champ de vue fixe a mm par b mm et un détecteur donné, composé de n pixels par m pixels, imposent un échantillonnage spatial minimal égal à $a/n = b/m$ mm. L'échantillonnage spatial est la distance entre deux points mesurés. Il est généralement égal ou très proche de la résolution latérale. Cette dernière correspond à la distance minimale qui doit séparer deux points afin qu'ils soient observables indépendamment, ou « résolus ». Cette dernière est limitée par la diffraction de la lumière sur les bords de l'ouverture de l'objectif. Un critère souvent retenu pour l'exprimer est le critère de Rayleigh. Il vaut dans le cas d'une illumination incohérente et d'une ouverture circulaire :

$$r = 0,61 \frac{\lambda_0}{N.A.} \quad (2-19)$$

où λ_0 est la longueur d'onde et $N.A.$ est l'ouverture numérique ou angulaire qui détermine le plus grand angle de pente qui peut être mesuré sur la surface. Elle est égale à :

$$N.A. = n \sin(\theta) \quad (2-20)$$

où n est l'indice de réfraction du milieu séparant l'objectif et la surface et θ est l'angle d'acceptation de l'ouverture.

La résolution latérale peut également être exprimée par le critère de Sparrow :

$$r = 0,47 \frac{\lambda_0}{N.A.} \quad (2-21)$$

Ce dernier est souvent retenu par les équipementiers. Il correspond à la distance séparant les maximums d'intensité des figures de diffraction, de deux points objets, dans le cas où la fonction de convolution de ces dernières ne présente plus de creux en son centre²¹.

La résolution verticale, de l'ordre du nanomètre, dépend de la façon d'extraire l'information topographique à partir de la figure d'interférences. Elle est donc différente d'un mode de mesure à l'autre.

Le détecteur est un capteur d'image ou caméra qui transforme l'intensité lumineuse en signal électrique. Il peut être analogique ou digital. Dans le cas où il est digital il peut être de type :

- CCD (pour Charge Coupled Device) ;
- CMOS (pour Complementary Metal Oxide Semiconductor).

Le capteur CCD est historiquement le plus répandu. Néanmoins, il semble que cette tendance soit en train de s'inverser. En effet, le capteur CMOS présente un faible coût de fabrication puisqu'il tire profit des technologies développées pour la fabrication des circuits intégrés. De plus, sa consommation électrique est cent fois plus faible que celle d'un capteur CCD. Outre ces aspects, son principal avantage est que, contrairement au capteur CCD, chaque pixel est adressable individuellement et possède son propre amplificateur ce qui permet une conversion directe de la charge sans transfert. A l'inverse, le capteur CCD et son amplificateur offre un meilleur rapport signal sur bruit que le capteur CMOS. Le choix du capteur dépendra donc du type d'application. Dans le cas d'une mesure qui nécessite une vitesse de traitement de l'image élevée, le capteur CMOS sera privilégié. Pour une qualité d'image optimale, le capteur CCD sera choisi.

²¹ Ce critère est très peu abordé dans la littérature. En conséquence aucune démonstration de ce dernier ne peut être fournie.

1.2 Les modes de mesure

La figure d'interférences captée par le détecteur du microscope interférométrique permet d'extraire la topographie de l'échantillon. Il existe pour cela plusieurs techniques qui correspondent aux modes de mesure. Le fonctionnement des deux modes utilisés durant ce travail de thèse sont décrits dans cette partie. Il s'agit de l'interférométrie par décalage de phase (ou PSI pour Phase Shifting Interferometry) et de l'interférométrie par balayage vertical (ou VSI pour Vertical Scanning Interferometry).

L'interférométrie à décalage de phase

Comme son nom l'indique ce mode implique un décalage, continu ou discret, de la phase lors de la mesure. Il est induit soit par un décalage de la longueur d'onde du faisceau (monochromatique), soit par une modification du chemin optique (Leach 2011). Dans ce dernier cas c'est un élément piézoélectrique qui assure le décalage du miroir de référence de manière à induire un décalage de la phase d'une certaine valeur. Dans notre cas il s'agit d'une modification du chemin optique par un décalage discret de la position du miroir de référence sur l'axe optique (z). Dans ce contexte, l'utilisation d'une source lumineuse monochromatique est nécessaire afin de pouvoir extraire la topographie de l'échantillon en s'appuyant sur la relation :

$$\boxed{\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(x, y)} \quad (2-22)$$

La matrice d'intensité $I_i(x, y)$ est enregistrée après chaque décalage de phase. Il existe de nombreux algorithmes basés sur un nombre de pas, un décalage de phase ou encore un traitement des données différents (Freischlad and Koliopoulos 1990; Hibino, Oreb et al. 1996; Surrel 1996; Novak, Novak et al. 2008). Le choix de l'algorithme est basé sur un compromis entre erreur minimale, temps de mesure minimum et simplicité d'utilisation et de mise en œuvre. Les résultats présentés durant ce travail de thèse sont obtenus à partir de l'algorithme « à quatre sauts » détaillé ci-après.

L'intensité des franges d'interférences après chaque saut de phase de $\frac{\pi}{2}$ est donnée par :

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= I_0[1 + \cos \varphi(x, y)] \\
 I_2(x, y) &= I_0 \left\{ 1 + \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{\pi}{2} \right] \right\} \\
 I_3(x, y) &= I_0 \{ 1 + \cos[\varphi(x, y) + \pi] \} \\
 I_4(x, y) &= I_0 \left\{ 1 + \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{3\pi}{2} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{2-23}$$

ce qui implique :

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right]. \tag{2-24}$$

La gamme de hauteurs caractérisable en mode PSI est limitée par le principe de la mesure. En effet, la fonction tangente qui permet de déterminer $\varphi(x, y)$ est π -périodique. Cette périodicité est élargie à 2π grâce à la connaissance des signes de $\cos(\varphi)$ et $\sin(\varphi)$. Néanmoins, en présence d'une topographie supérieure à $\frac{\lambda}{2}$ entre deux pixels adjacents, il y aura une ambiguïté sur la phase de $n2\pi$ (où n est un entier relatif), soit $n\frac{\lambda}{2}$ sur la hauteur. Des algorithmes permettent de supprimer cette ambiguïté.

La résolution verticale de ce mode est égale à 0,1 nm.

L'interférométrie à balayage vertical

Ce mode de mesure peut être désigné par différents termes tels que l'interférométrie à faible cohérence, l'interférométrie en lumière blanche ou encore l'interférométrie à balayage vertical (Leach 2011). Son intérêt réside dans sa capacité à mesurer des marches plus grandes que $\frac{\lambda}{2}$. Il est actuellement le mode de mesure le plus couramment implémenté sur les équipements industriels. Ce mode utilise une source lumineuse blanche.

L'intensité, pour un pixel donné, est donc la somme des intensités de chaque longueur d'onde du spectre de la source lumineuse blanche :

$$I(z) = 2 \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I_o(\lambda) \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(z) \right] \right\} d\lambda \quad (2-25)$$

où λ_{\min} et λ_{\max} sont les longueurs d'onde minimum et maximum de la source lumineuse.

La distribution spectrale d'intensité de la source, $I_o(\lambda)$, est considérée comme une succession de raies spectrales notées $I_o(d\lambda)$. Dans ce contexte, l'intensité de chacune des raies spectrales, $I_o(d\lambda)$, est négligeable (nulle) excepté dans un court intervalle de longueurs d'onde centré sur la longueur d'onde moyenne, $\bar{\lambda}$, de cet intervalle.

On procède au changement de variable suivant :

$$\begin{aligned} \lambda' &= \lambda - \bar{\lambda} \\ j(\lambda') &= I_o(\bar{\lambda} + \lambda'). \end{aligned} \quad (2-26)$$

(2-25) devient :

$$I(z) = 2 \int_{\lambda'_{\min}}^{\lambda'_{\max}} j(\lambda') \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{(\bar{\lambda} + \lambda')} \delta(z) \right] \right\} d\lambda', \quad (2-27)$$

que l'on peut réécrire sous la forme suivante :

$$I(z) = P + C[\delta(z)] \cos \left[\frac{2\pi}{\bar{\lambda}} \delta(z) \right] - S[\delta(z)] \sin \left[\frac{2\pi}{\bar{\lambda}} \delta(z) \right] \quad (2-28)$$

où :

$$\begin{aligned}
P &= 2 \int_{\lambda'_{\min}}^{\lambda'_{\max}} j(\lambda') d\lambda', \\
C[\delta(z)] &= 2 \int_{\lambda'_{\min}}^{\lambda'_{\max}} j(\lambda') \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda'} \delta(z) \right] d\lambda', \\
S[\delta(z)] &= 2 \int_{\lambda'_{\min}}^{\lambda'_{\max}} j(\lambda') \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda'} \delta(z) \right] d\lambda'.
\end{aligned} \tag{2-29}$$

A partir de l'équation (2-28) on trouve²² :

$$I(z) = P \left\{ 1 + \frac{\sqrt{C^2 + S^2}}{P} \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(z) - \phi \right] \right\} \tag{2-30}$$

où $\tan \phi = -\frac{S}{C}$. On en déduit les extremums de $I(z)$:

$$I_{\text{extremum}} = P \pm \sqrt{C^2 + S^2}. \tag{2-31}$$

Ainsi, la fonction de visibilité est égale à :

$$\gamma[\delta(z)] = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\sqrt{C^2 + S^2}}{P}, \tag{2-32}$$

D'après notre hypothèse de départ l'intensité, $j(\lambda')$, d'une raie spectrale est différente de zéro pour $|\lambda'| \ll \bar{\lambda}$. Dans ce contexte les variations de $C[\delta(z)]$ et $S[\delta(z)]$ sont négligeables devant celles de $\cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(z) \right]$ et $\sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(z) \right]$. De ce fait, les extremums de $I(z)$ sont, dans une bonne approximation, donnés par :

$$\frac{dI(z)}{d\delta(z)} = -\frac{2\pi}{\lambda} \left\{ C \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(z) \right] + S \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(z) \right] \right\} = 0, \tag{2-33}$$

²² On utilise l'identité suivante : $a \cos x + b \sin x = R \cos(x - c)$, avec $R = \sqrt{a^2 + b^2}$ et $\tan c = b/a$.

soit si l'égalité suivante est satisfaite :

$$\tan \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta(z) \right] = -\frac{S}{C}. \quad (2-34)$$

On observe que la courbe de visibilité est dépendante de la distribution d'intensité spectrale de la source et correspond à l'enveloppe de la courbe d'intensité normalisée $[I(z)/P] - 1$. Le premier minimum de la fonction de visibilité, $\gamma[\delta(z)]$, est égal à la longueur de cohérence temporelle de la source. Cette dernière est donc logiquement liée à la distribution d'intensité spectrale de la source²³. Durant la mesure et pour chaque pixel, ce sont les variations de la fonction intensité qui sont enregistrées. La fonction visibilité peut ensuite être calculée à partir de la fonction intensité mesurée.

La faible cohérence temporelle d'une source non monochromatique implique une forte intensité lorsque les chemins optiques, miroir de référence et échantillon, sont équivalents et une décroissance rapide de l'intensité aux abords de cette position (Figure 2-7).

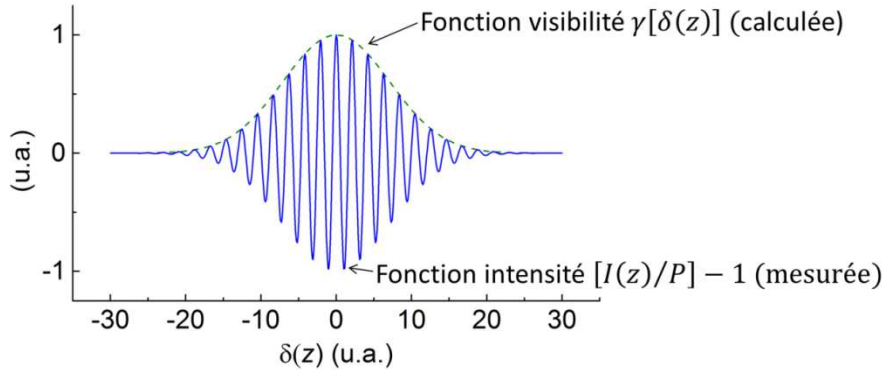


Figure 2-7 : Représentation de la fonction de visibilité calculée et de la fonction d'intensité mesurée en fonction de la différence de chemin optique dans le cas d'une source lumineuse blanche dont la distribution d'intensité spectrale est une gaussienne.

²³ Dans le cas d'une source quasi-monochromatique, la distribution d'intensité spectrale peut être assimilée à une fonction porte. La symétrie de la distribution d'intensité spectrale de la source, et de la fonction porte, conduit à $\gamma = |C|/P$. La fonction de visibilité est alors un sinus cardinal dont le premier minimum est donné par $\delta(z) = (\bar{\lambda})^2 / \Delta\lambda$, où $\Delta\lambda$ est l'étendu spectral de la source. On retrouve l'expression de la longueur de cohérence temporelle la plus souvent utilisée. Cette dernière indique que la longueur de cohérence temporelle d'une source est liée à son degré de mono chromaticité.

La fonction de visibilité change beaucoup plus lentement que la fonction intensité et présente un pic unique. La détection de la position z du pic d'intensité (de Groot and de Lega 2004) pour chaque pixel permet d'extraire la topographie de la surface de l'échantillon (Figure 2-8).

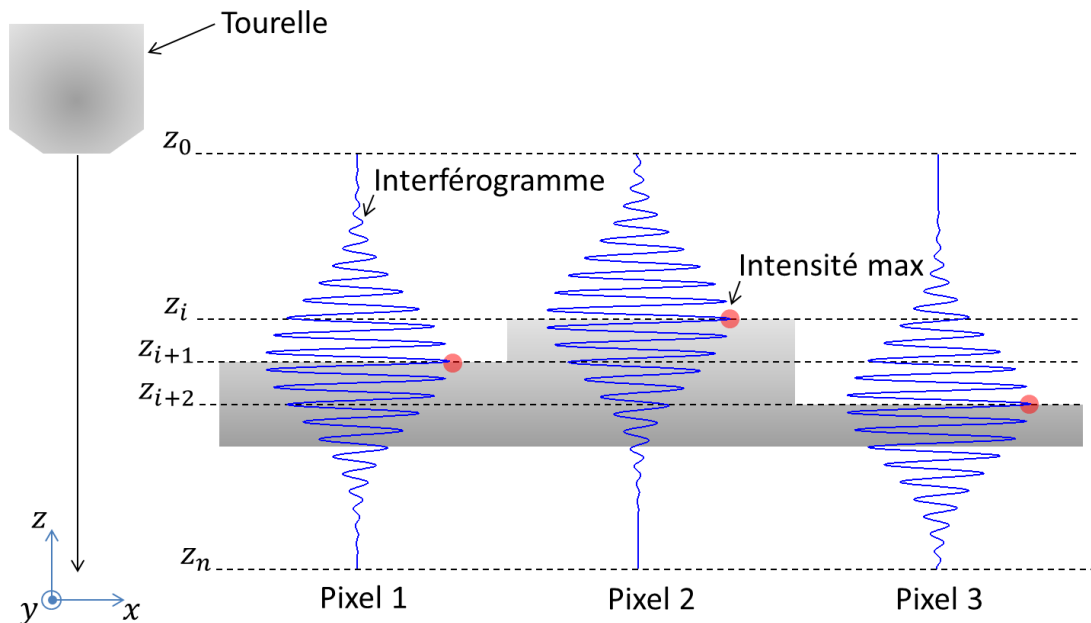


Figure 2-8 : Illustration du principe de la mesure de topographie par interférométrie à balayage vertical.

Différentes techniques existent pour détecter la position z du pic d'intensité, on peut citer entre autres : la PFSM, pour *Peak Fringe Scanning Microscopy* (Montgomery and Fillard 1993) ; la démodulation d'amplitude (Caber 1993) ou encore la FSA, pour *Five-Sample-Adaptive non linear algorithm* (Larkin 1996). C'est la PFSM qui est utilisée dans ce travail de thèse.

L'algorithme PFSM est simple, il exige que seulement trois images soient stockées en mémoire vive, ce qui permet un gain de temps et d'espace mémoire.

- $I_{\text{mesurée}}$ permet d'acquérir les images d'intensité à chaque position z de l'échantillon.
- I_{max} sert à mémoriser l'intensité maximale de chaque pixel.
- H sert à mémoriser des altitudes pour chaque position (x, y) de la surface.

Cet algorithme s'applique indépendamment à chaque pixel.

Soit L la longueur de balayage en z définie par l'utilisateur.

Pour i allant de 0 à L :

$$I_{\text{mesurée}} = I(z_0) ;$$

Si $i = 0$:

$$I_{\text{max}} = I_{\text{mesurée}} ;$$

$$H = z_0 ;$$

Sinon :

$$\text{Si } I_{\text{mesurée}} > I_{\text{max}} :$$

$$I_{\text{max}} = I_{\text{mesurée}} ;$$

$$H = z_i ;$$

Fin ;

Fin.

Le balayage suivant z est continu. L'algorithme est appliqué en temps réel durant le balayage. La fréquence d'acquisition de $I(z_i)$ n'est pas ajustable par l'utilisateur. Le processus est répété jusqu'à ce que l'échantillon ait été déplacé du nombre de pas choisi.

La résolution verticale de ce mode est de l'ordre du nanomètre.

1.3 Intérêt de la technique

La microscopie interférométrique est connue depuis plusieurs dizaines d'années et suscite de plus en plus d'intérêt (Valley, Koliopoulos et al. 2001; de Groot and de Lega 2007; Freischlad, Tang et al. 2007; Ghim and Kim 2009). Ce sont les progrès technologiques réalisés dans différents domaines, tels que l'optique, la mécanique et l'électronique, qui en sont à l'origine. La mise au point d'algorithmes de traitement des données de plus en plus performants, tant en termes de précision qu'en termes de temps de mise en œuvre, joue également un rôle important dans ce regain d'intérêt. Néanmoins, ce sont principalement les progrès dans le domaine de la microélectronique qui l'ont permis. En effet, les capacités de calcul et de

stockage des données ont considérablement augmenté ces dernières années. Ceci ouvre de nouvelles perspectives.

Il est donc désormais « en théorie » possible, d'effectuer une mesure de la nano topographie avec un pouvoir de résolution latérale élevé sur de très grandes zones. La mesure génère un fichier de plusieurs millions de points qui peut être stocké et traité afin de fournir les informations désirées.

Deux approches sont envisageables :

- effectuer la mesure à l'aide d'un grand et unique champ de vue. Dans ce cas, la résolution latérale est faible ($\approx 100 \mu\text{m}$) mais l'aire d'acquisition est grande ($\approx 700 \text{ cm}^2$) ;
- effectuer la mesure par recollement de plusieurs champs de vue. Dans ce cas, la résolution latérale est élevée ($\approx 1 \mu\text{m}$) mais l'aire d'acquisition est réduite ($\approx 10 \text{ cm}^2$).

La seconde approche a été privilégiée en raison de sa résolution latérale élevée.

II. Conditions expérimentales

2.1 Description de l'équipement

L'équipement utilisé est un Veeco WYKO NT9300 de l'équipementier BrukerTM. Il est équipé de trois objectifs interférométriques (Figure 2-5 et Figure 2-6) de grossissement X5, X20 et X50 et d'un sélectionneur de champ de vue de grossissement X0,55, X1 et X2. Le type d'interféromètre, le champ de vue, la résolution latérale et l'échantillonnage spatial pour chaque couple objectif/sélectionneur de champ de vue sont résumés dans le Tableau 2-1.

Objectif		X5	X10	X20	X50
Type d'interféromètre		Michelson		Mirau	Mirau
Ouverture numérique		0,12	0,25	0,4	0,55
Résolution latérale (μm)		2,23	1,07	0,67	0,49
Echantillonnage spatial (μm)	X0,55	3,6	1,8	0,9	0,36
	X1	1,98	0,99	0,5	0,2
	X2	0,99	0,5	0,25	0,1
Champ de vue (mm x mm)	X0,55	2,3 x 1,73	1,15 x 0,86	0,58 x 0,43	0,23 x 0,17
	X1	1,27 x 0,95	0,63 x 0,48	0,32 x 0,24	0,13 x 0,1
	X2	0,63 x 0,48	0,32 x 0,24	0,16 x 0,12	0,06 x 0,05

Tableau 2-1 : Tableau des caractéristiques des objectifs interférométriques de l'équipement Veeco WYKO NT9300 utilisé durant ce travail de thèse. La résolution latérale est calculée à partir du critère de Sparrow à 535 nm.

L'interféromètre de Michelson est utilisé pour des tailles de champ de vue supérieures à celles atteignables avec l'interféromètre de Mirau. En effet, l'augmentation de l'ouverture numérique, ou résolution, et donc la diminution de la taille du champ de vue conduit à une diminution des longueurs focales. Ceci implique un rapprochement du miroir de référence et de l'échantillon vis-à-vis de la lentille de l'objectif. La taille du cube séparateur, qui se situe entre ces éléments, ne le permet pas. La géométrie du montage interférométrique de Mirau permet de résoudre ce problème. L'interféromètre de Mirau est un dérivé de l'interféromètre de Michelson et ne peut pas être utilisé avec des objectifs à faibles ouvertures numériques. En effet, dans le montage de Mirau, le miroir de référence, de par sa position, bloque une partie de la lumière incidente. Il est donc utilisé uniquement avec des ouvertures numériques élevées, de cette façon il reste suffisamment de lumière pour que le détecteur puisse mesurer l'intensité des interférences.

La source lumineuse du mode VSI est une diode électroluminescente blanche présentant un spectre d'émission étendu de 400 à 770 nm. Le spectre présente un pic principal à 590 nm et un pic secondaire à 450 nm. Le mode PSI utilise une diode électroluminescente émettant dans le vert ($\lambda = 535 \text{ nm}$).

Le détecteur est une caméra digitale CCD de 640 pixels par 480 pixels de 9,9 micromètres de côté. La platine de mesure peut accueillir des plaques de 200 et 300 mm de diamètre et est équipée d'un système, facultatif, de maintien de la plaque par aspiration. Le chargement des plaques est manuel.

2.2 Méthodologie

Des puces de deux tailles différentes sont caractérisées dans ce chapitre. La première taille est égale à 13 millimètres par 16,5 millimètres de côté, soit une surface de 2,15 cm². Il s'agit d'une taille de puce standard. La seconde taille de puce est égale à 26,5 millimètres par 32,5 millimètres de côté, soit une surface de 8,6 cm². Il s'agit de la plus grande taille de puce fabriquée au sein de l'unité de fabrication de Crolles.

Sauf mention contraire toutes les plaques caractérisées durant ce chapitre ont subi une étape de polissage avec « arrêt sur nitrure de silicium »²⁴.

L'interféromètre de Michelson (objectif X5) et le sélectionneur de champ de vue X0,55 sont utilisés. Dans cette configuration la taille du champ de vue est égale à 2,4 millimètres par 1,8 millimètre et la résolution latérale réelle est égale à 3,6 micromètres. La résolution latérale réelle est la plus grande valeur du couple : résolution latérale - échantillonnage spatial. La configuration choisie permet, par recollement d'images, d'accéder à la topographie d'une puce complète quelle que soit sa taille. Le choix de la configuration est le résultat d'un compromis entre temps de mesure, temps de traitement des données, capacité de stockage des données et type d'information recherchée. La résolution latérale doit être suffisante pour fournir une information statistiquement représentative sans être un frein à l'utilisation de la technique dans un contexte de production. Si une information plus fine est recherchée dans une zone spécifique, il est possible d'utiliser une autre configuration objectif/sélectionneur de champ de vue afin de grossir la zone caractérisée ou encore d'utiliser une autre technique de caractérisation déjà disponible telle que la microscopie à force atomique.

²⁴ Le procédé de CMP correspondant est détaillé dans le chapitre 4 section 2.2.

L'enjeu de ce travail de thèse est la caractérisation de surfaces présentant avant et après polissage mécano-chimique des amplitudes de topographie inférieures à la centaine de nanomètres. Ceci permet de privilégier l'utilisation du mode PSI mieux résolu verticalement. La capacité de mesure du mode VSI est également évaluée. En effet, il s'agit du mode le plus couramment implémenté sur les équipements industriels disponibles à l'heure actuelle.

En complément des techniques détaillées dans le chapitre 1 un microscope confocal chromatique et un interféromètre de Fizeau sont également utilisés.

Le microscope confocal chromatique utilisé est un MicroProf 300 98 MPR 1298 de l'équipementier FRTTM pour *Fries Research & Technology*TM.

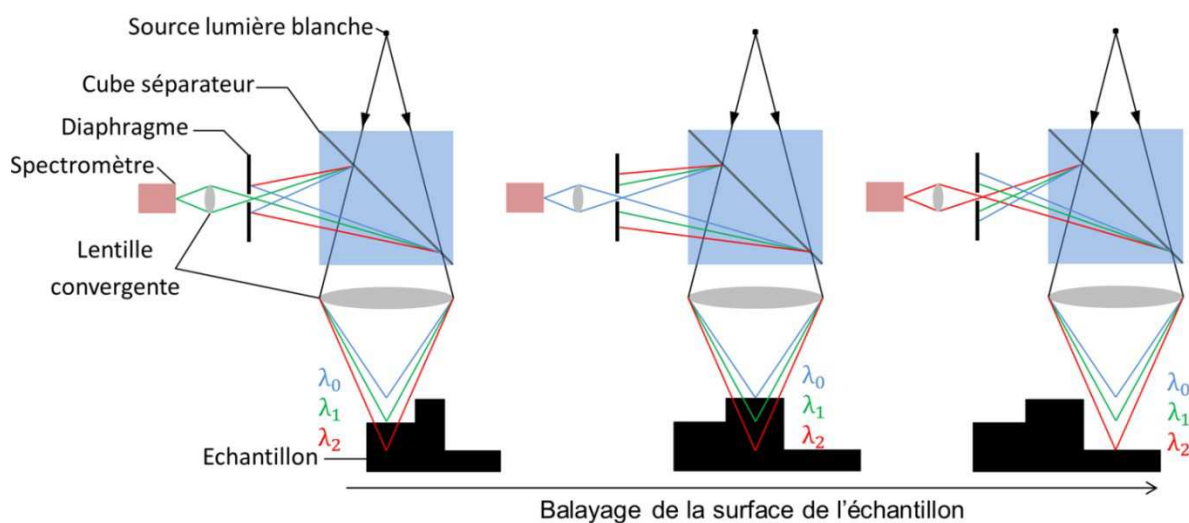


Figure 2-9 : Schéma de principe d'un microscope confocal chromatique.

Cette technique (Figure 2-9) utilise l'aberration chromatique d'une lentille pour focaliser les composantes monochromatiques d'une lumière blanche à différentes positions sur l'axe optique. La lumière réfléchiée par la surface est filtrée par un diaphragme de manière à récolter uniquement les longueurs d'ondes focalisées. Un spectromètre²⁵ mesure ensuite l'intensité des longueurs d'onde filtrées. Une table de calibration permet d'extraire la topographie de l'échantillon. Cette technique est généralement utilisée pour caractériser les déformations des

²⁵ Aucune information sur le spectromètre n'est fournie par l'équipementier.

plaques. En effet, elle est considérée comme une technique de référence pour la mesure des déformations des plaques car elle respecte la norme SEMI relative à ce type de mesure (ASTM-International 2002). Cet équipement est équipé d'une source lumineuse halogène dont la gamme spectrale s'étend de 400 nm à 680 nm. La lentille de dispersion chromatique fournit une étendue de mesure en z de $600 \mu\text{m}^{26}$. La résolution verticale, liée à l'étendue de mesure en z et à la résolution spectrale du spectromètre est égale à 40 nm. La résolution latérale minimale est égale à $1 \mu\text{m}$ et est limitée par la précision de déplacement du capteur confocal et la taille du faisceau. La plaque est fixe durant la mesure. La mesure est effectuée point par point par déplacement du capteur confocal suivant les axes x et y . Bien que des capteurs mieux résolus en z existent, cette technique ne permet pas de répondre à la problématique de la thèse. En effet, une acquisition point par point conduit à des temps de mesure longs. De plus ce type d'acquisition génère des problèmes qui seront discutés dans la section 3.4 de ce chapitre.

L'interféromètre de Fizeau (Figure 2-10) est un GPI-XP/D de l'équipementier ZygoTM. Il est équipé d'un laser hélium-néon ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) et est utilisé en mode PSI en décalage optique de phase.

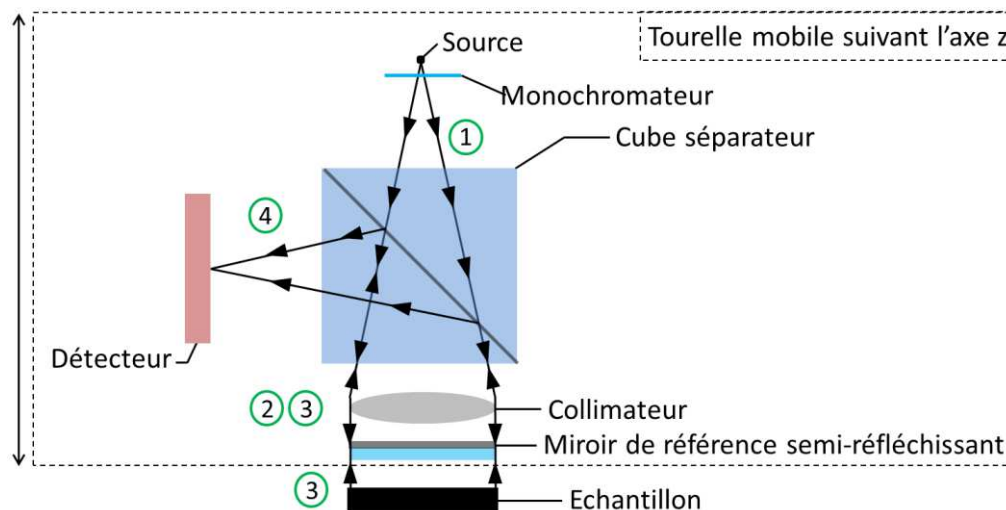


Figure 2-10 : Schéma de principe de l'interféromètre de Fizeau. Interféromètre à division d'amplitude. La position de la tourelle suivant l'axe z est réglable. Les numéros cerclés indiquent le parcours de la lumière.

²⁶ Cette valeur est calculée grâce à la formule $(\delta f/f) + (\delta n/n - 1) = 0$, où δf est l'étendue de la dispersion focal, δn la dispersion d'indice optique, f la focale moyenne et n l'indice moyen (Born and Wolf 1999, section 4.7.1.). $\delta f \approx (0,01/0,5) \times 10000 \approx 200 \mu\text{m}$ (calcul de l'ordre de grandeur).

L'avantage de cet équipement est qu'il permet l'acquisition d'un grand champ de vue sans recollement d'images. La taille maximale du champ de vue est égale à 150 millimètres de diamètre. La résolution latérale associée est égale à 150 micromètres. Il est possible d'atteindre une résolution latérale de 25 micromètres à l'aide d'un grossissement. Le champ de vue est alors réduit à 25 millimètres de diamètre. La résolution verticale de cet équipement est de l'ordre du nanomètre. Le détecteur est une caméra digitale CCD de 1000 pixels par 1000 pixels de 150 micromètres de côté.

Les barres d'erreur représentent l'incertitude de mesure pour un intervalle de confiance de 95,4%. Lorsqu'elles ne sont pas visibles, les barres d'erreur sont confondues avec les points de mesure. Sauf mention contraire, elles représentent l'erreur de fidélité de la mesure²⁷. Deux types d'incertitude de mesure sont utilisés. L'incertitude de mesure de l'amplitude de topographie d'une structure, soit une hauteur de marche et l'incertitude de mesure de l'amplitude de topographie d'un circuit intégré. Cette dernière correspond à la différence de hauteur entre le point le plus haut et le point le plus bas présent dans le circuit intégré.

III. Résultats et discussion

L'objectif de cette étude est de permettre l'utilisation de la microscopie interférométrique dans le cadre de la caractérisation de variations nanométriques de la topographie sur toute la surface d'un circuit intégré, c'est-à-dire pour des surfaces de plusieurs centimètres carrés. Pour cela différents freins liés à ce type d'application doivent être levés. Des solutions sont proposées pour s'affranchir des erreurs de mesure dus à la présence de matériaux transparents et supprimer les contributions topographiques indésirables. La fiabilité de l'algorithme de recollement d'images et la justesse de la mesure sont évaluées. Une nouvelle méthode de mise à plat des données topographiques est également proposée et une approche alternative de la mesure est étudiée. Enfin, l'impact de différents paramètres sur le temps de la mesure est discuté.

²⁷ Détaillé dans le chapitre 1 section 3.1.

3.1 Matériaux transparents et erreurs de mesure

Dans l'industrie microélectronique, les surfaces sont la plupart du temps, constituées de plusieurs matériaux diélectriques. Ces matériaux, transparents aux longueurs d'onde utilisées en microscopie interférométrique, génèrent des erreurs de mesure (Figure 2-11). Le chemin optique emprunté par la lumière n'est plus caractéristique de la topographie de la surface. De plus, diverses couches transparentes conduisent à des déphasages différents dépendant de l'indice de réfraction.

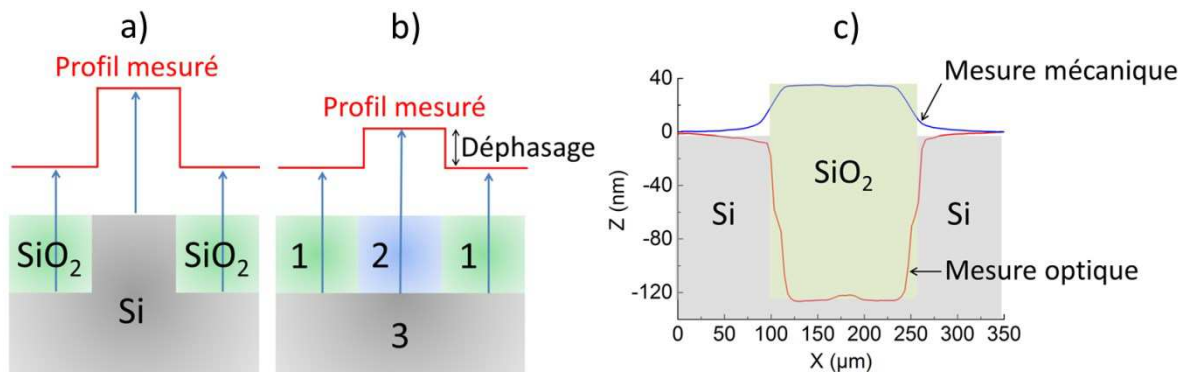


Figure 2-11 : a) Illustration d'une erreur de mesure générée par la présence d'un matériau transparent ; b) illustration d'une erreur de mesure générée par la présence de deux matériaux transparents présentant des indices optiques différents. Si $n_1 > n_2$ l'onde traversant le milieu 1 présente un retard ou déphasage vis-à-vis de l'onde traversant le milieu 2 ; c) exemple de l'impact d'une erreur de mesure générée par la présence d'un matériau transparent.

Des solutions à des cas particuliers ont déjà été proposées.

Couche transparente très épaisse (supérieure au micromètre)

Dans ce cas, l'utilisation du mode VSI rend la mesure possible. Il suffit de régler le balayage vertical de manière à mesurer uniquement l'intensité réfléchie par la surface.

Couche transparente épaisse (supérieure à 500 nanomètres)

La méthode précédente n'est pas applicable dans ce cas car le déplacement de la tourelle sur laquelle est fixé l'objectif n'est pas assez précis. Néanmoins, il existe une solution, encore une fois, basée sur l'utilisation du mode VSI. Elle consiste à détecter directement les pics d'intensité

(correspondant aux interfaces) sur l'interférogramme de chaque pixel. Il est également possible de dé-corréler ces pics d'intensité par un traitement des données (Kitagawa 2004). Pour de faibles épaisseurs, les signaux provenant de chaque interface ne sont plus discernables les uns des autres (Figure 2-12).

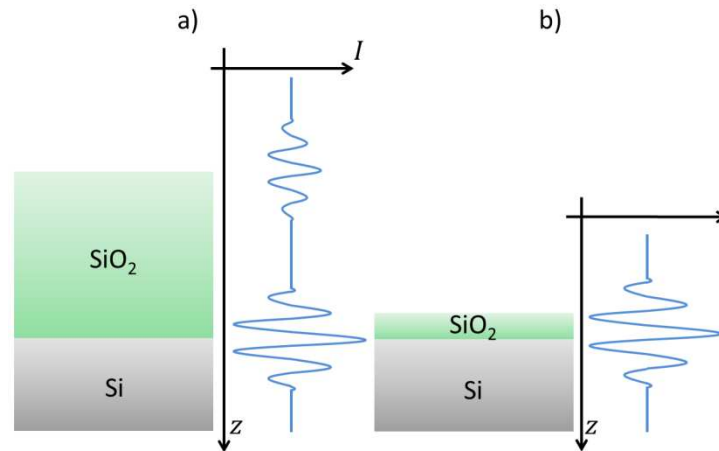


Figure 2-12 : Illustration de la détection d'interfaces a) dans le cas d'une couche transparente épaisse supérieure à 500 nm ; b) dans le cas d'une couche transparente fine d'épaisseur inférieure à 500 nm. Dans ce cas on observe la fusion des signaux de chaque interface.

Couche transparente fine (inférieure à 500 nanomètres)

Dans cette configuration, correspondant aux surfaces caractérisées dans cette étude, il n'existe pas encore de solution industriellement applicable. La bibliographie montre que le problème donne lieu à de nombreux travaux et que des solutions commencent à émerger. Ainsi, de Groot et de Lega suggèrent de travailler dans le plan « pupille ». Cette méthode donne accès à l'intensité de lumière réfléchie en fonction de l'angle d'incidence, de la longueur d'onde et de la polarisation (de Groot and de Lega 2008; de Lega and de Groot 2008). Debnath propose une approche basée sur une mesure résolue spectralement, couplée à un traitement des données utilisant la transformée de Fourier de la fonction d'interférences spectrales (Debnath, Kim et al. 2010). Il est également important de préciser que les progrès dans le domaine de la physique ne sont pas les seuls à permettre des avancées. Le traitement des données, notamment par transformée de Fourier, est de première importance. Les avancées dans ce domaine sont nombreuses, notamment concernant la théorie des ondelettes (Daubechies 1992). Il semble donc probable qu'une solution viable industriellement apparaisse dans les années à venir. Cet

aspect de la microscopie interférométrique n'a pas pu être abordé car l'équipement utilisé ne permet pas d'avoir accès aux interférogrammes des différents pixels (Figure 2-8).

Afin de s'affranchir de cette limitation, une couche de 30 nanomètres de tantale est déposée²⁸ sur la surface des plaques à mesurer. Cette couche a été choisie pour :

- être opaque aux longueurs d'onde utilisées. Ceci est vérifié expérimentalement à l'aide de la profilométrie mécanique et théoriquement grâce à la loi de Beer-Lambert. Cette dernière montre que l'intensité lumineuse est diminuée de 93% après la traversée de 60 nm de tantale. Ce calcul est effectué pour une longueur d'onde de 535 nm, correspondant au mode PSI, et ne tient pas compte des diminutions d'intensité liées aux interfaces ;
- suivre parfaitement la topographie. Ceci est vérifié à diverses échelles.

Pour des motifs de quelques micromètres, il est observé par profilométrie mécanique (Figure 2-13) que la couche de tantale n'a aucun impact sur la topographie

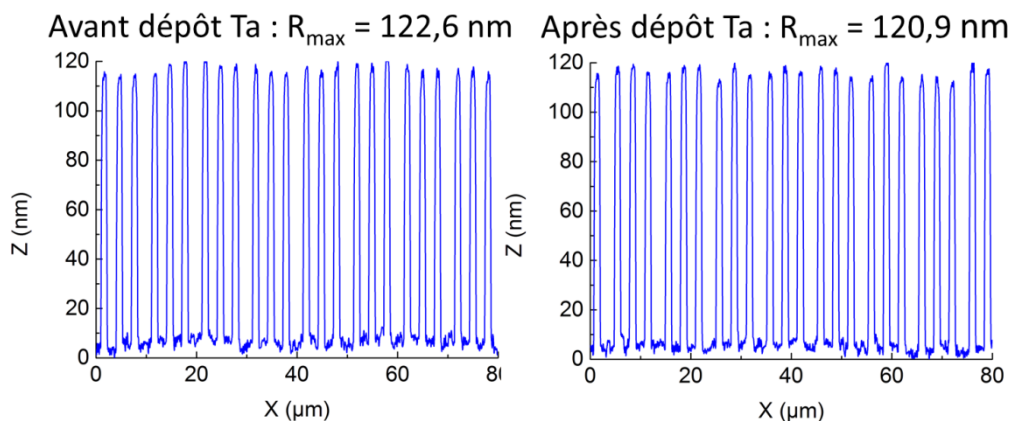


Figure 2-13 : Mesures obtenues par profilométrie mécanique de la topographie avant et après dépôt de 30 nm de tantale (plaque non polie).

Les faibles variations visibles entre la mesure avant et après dépôt de tantale sont attribuées à l'erreur de positionnement de l'équipement.

²⁸ Dépôt physique en phase vapeur à température ambiante.

Il est également montré par microscopie à force atomique²⁹ (Figure 2-14) que le dépôt n'impacte pas la topographie de motifs de quelques centaines de nanomètres.

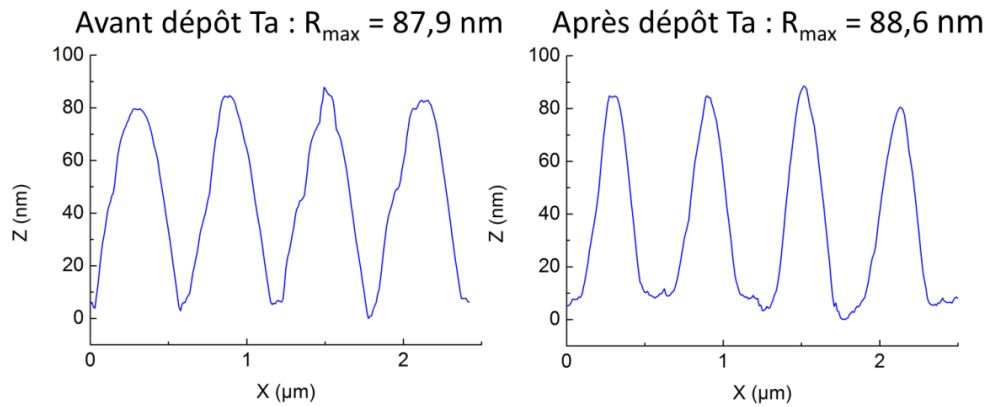


Figure 2-14 : Mesures obtenues par microscopie à force atomique de la topographie avant et après dépôt de 30 nm de tantale (plaque non polie).

Comme pour la profilométrie mécanique, les faibles variations apparentes entre la mesure avant et après dépôt sont attribuées à l'erreur de positionnement.

En conclusion, le dépôt de 30 nm de tantale est conforme et n'a donc aucun impact sur la topographie originale de la surface et ce sur toute la gamme de résolutions latérales, s'étendant de 500 nm à 3,6 μm , couverte par notre microscope interférométrique. La suppression des erreurs de mesure provenant de la présence de matériaux transparents permet d'investiguer les autres limites de la technique lors de son utilisation sur des distances centimétriques.

3.2 Etude des contributions topographiques indésirables

Cette section s'intéresse à des puces dont la taille est égale à 13 mm par 16,5 mm, soit une surface de 2,15 cm².

²⁹ Le microscope à force atomique utilisé est un Veeco Digital Instruments Dimension 3100 de l'équipementier Bruker™. Ce dernier fonctionne en mode contact intermittent et mesure le changement d'amplitude d'oscillation du levier. Les images présentées durant ce travail de thèse présentent une résolution latérale de 10 nm et sont acquises à une fréquence de 0,5 Hz. Les pointes utilisées sont des pointes en silicium dopées phosphore de marque Bruker™ et de résistivité comprise entre 1 et 10 Ohm/cm. La longueur du levier est comprise entre 115 et 135 μm , sa largeur entre 30 et 40 μm , son épaisseur entre 3,5 et 4,5 μm , sa fréquence de résonance entre 242 et 348 kHz et sa constante de raideur entre 20 et 80 N/m.

L'un des principaux freins à l'utilisation de la microscopie interférométrique pour la caractérisation topographique de surfaces de plusieurs centimètres carrés est la présence de contributions topographiques indésirables. Ce phénomène est observable sur les données brutes de toutes les techniques de caractérisation topographique. Ces contributions peuvent être dues à des déformations de l'échantillon, au principe de la technique ou à des artéfacts de mesure. Un exemple courant est l'inclinaison relative de la surface de l'échantillon par rapport à la normale du miroir de référence qui induit dans la plupart des cas une inclinaison linéaire des données brutes. Celle-ci est systématiquement supprimée, de manière manuelle ou automatique. Les méthodes de caractérisation actuelles donnent lieu à deux cas pour lesquels l'impact de ce problème est limité.

Petites surfaces - quelques centaines de micromètres carrés

Dans ce cas, l'amplitude et la complexité des contributions topographiques indésirables sont faibles car les longueurs d'onde caractéristiques de ces dernières sont grandes. La suppression d'une inclinaison linéaire suffit la plupart du temps (Figure 2-15).

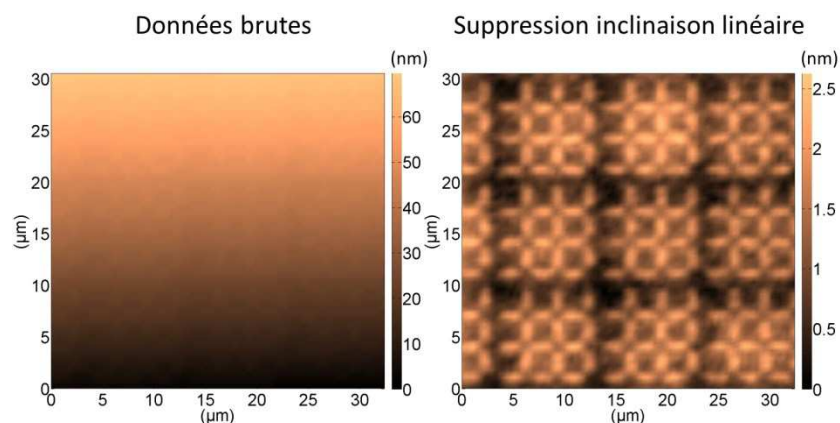


Figure 2-15 : Exemple de données topographiques brutes, issues de la mesure d'une petite surface, présentant une inclinaison linéaire et illustration de ces mêmes données topographiques après suppression de l'inclinaison linéaire. Mesure effectuée par microscopie interférométrique.

Très grandes surfaces - plusieurs centaines de centimètres carrés

L'objectif de ce type de caractérisation est d'étudier ces contributions topographiques, elles ne sont donc plus indésirables.

L'enjeu de la thèse s'inscrit dans une situation intermédiaire dans laquelle la surface à caractériser est suffisamment grande pour observer des contributions topographiques indésirables de fortes amplitudes et complexes. Il est donc indispensable de comprendre leur(s) origine(s) et de les supprimer sans perdre l'information recherchée (variations nanométriques de la topographie).

La contribution topographique indésirable de plus forte amplitude et de longueur d'onde la plus élevée provient de la déformation de la plaque. Elle est caractérisée à l'aide d'un microscope confocal chromatique, équipement de référence, dans l'industrie microélectronique, pour ce type de mesure. La plaque est placée sur trois points d'appui également espacés sur la circonférence d'un cercle de diamètre légèrement inférieur au diamètre de la plaque (300 mm). Une déformation de la plaque de type « ellipsoïdale et inclinaison » est observée sur la Figure 2-16. La flèche mesurée, pour un diamètre de 150 millimètres³⁰, est égale à $11\ \mu\text{m} \pm 0,6\ \mu\text{m}$.

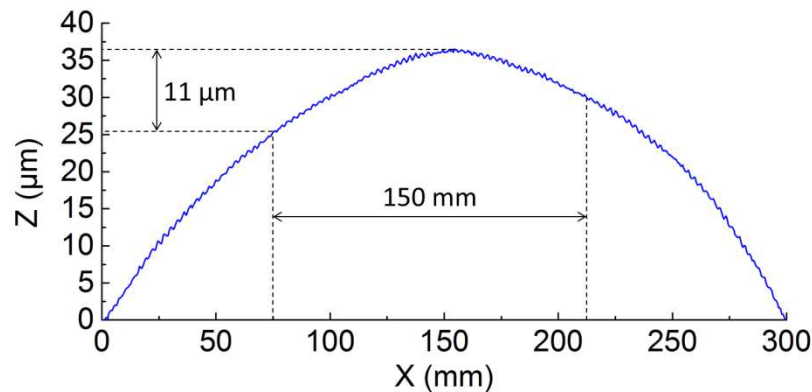


Figure 2-16 : Mesure obtenue par microscopie confocale chromatique de la déformation de la plaque le long du diamètre horizontal. La correction de type « inclinaison » a déjà été appliquée sur les données brutes.

La mesure est réitérée par interférométrie de Fizeau. Cette technique est également utilisée pour ce type d'application. Une déformation de la plaque identique à celle observée par microscopie confocale chromatique est constatée sur la Figure 2-17. La flèche mesurée est égale

³⁰ On s'intéresse uniquement à la flèche de la plaque sur un diamètre de 150 mm car l'interféromètre de Fizeau utilisé a une taille maximale de champ de vue égale à 150 mm de diamètre.

à $11,3 \mu\text{m} \pm 0,6 \mu\text{m}$ pour un diamètre de 150 millimètres (champ de vue maximum). Dans ce cas la plaque est posée sur un support massif et la mesure est faite sans aspiration pour ne pas impacter la déformation de la plaque.

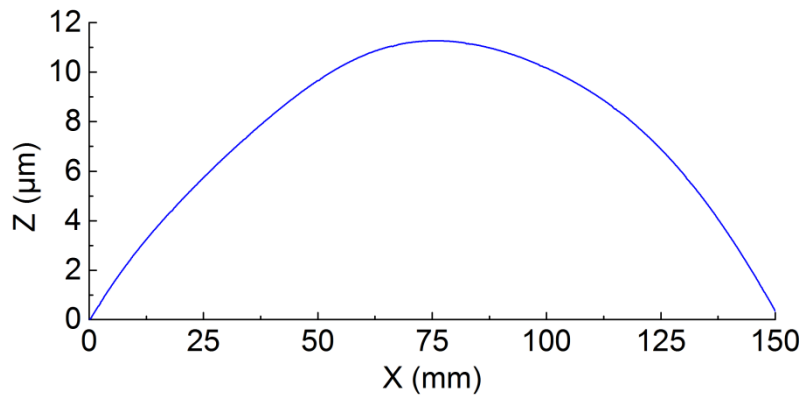


Figure 2-17 : Mesure obtenue par interférométrie de Fizeau de la déformation de la plaque le long du diamètre horizontal. La correction de type « inclinaison » a déjà été appliquée sur les données brutes.

Des résultats semblables, pour les deux techniques sont observés, ce qui permet de conclure qu'une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison » permet de supprimer pour des surfaces de deux centimètres carrés, la contribution topographique indésirable provenant de la déformation de la plaque. Ce résultat montre également la pertinence de la mesure par interférométrie de Fizeau qui a pu être comparée et corrélée à une technique de référence.

Sauf mention contraire, une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison » est systématiquement appliquée dans la suite de cette étude.

L'impact de l'aspiration de la plaque sur la mesure est étudié. Les mesures de deux puces avec et sans aspiration sont reportées sur la Figure 2-18. Il s'agit des circuits intégrés situés au centre et à mi-rayon de la plaque. Ces deux emplacements sont systématiquement mesurés en microélectronique.

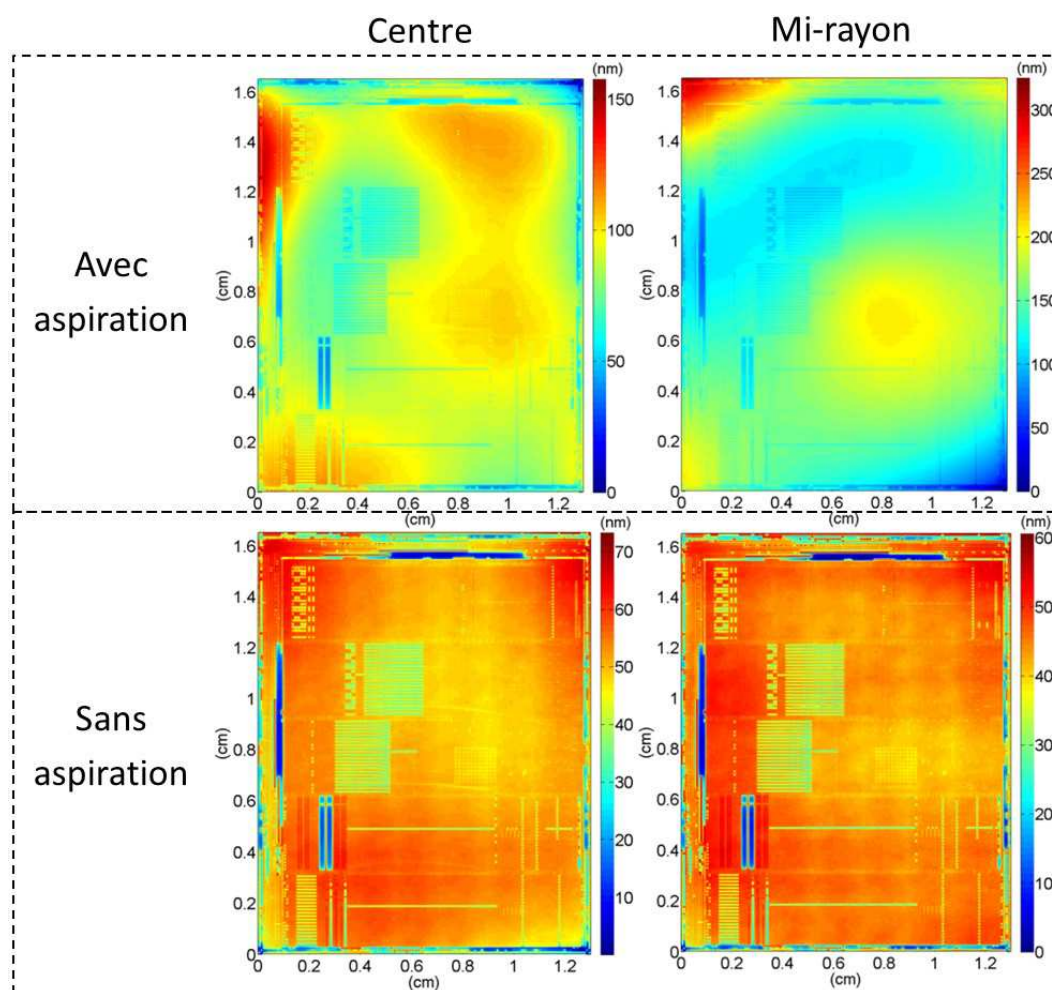


Figure 2-18 : Mesures obtenues par microscopie interférométrique (Michelson PSI) de la topographie de deux puces, situées au centre et à mi-rayon de la plaque. Les mesures sont effectuées avec et sans aspiration de la plaque.

L'amplitude de la topographie est semblable, $73,4 \text{ nm} \pm 3,7 \text{ nm}$ et $60,6 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$ pour les deux puces mesurées sans aspiration. Les deux puces mesurées avec aspiration présentent, entre elles, une différence conséquente, $157,7 \text{ nm} \pm 7,9 \text{ nm}$ et $325,6 \text{ nm} \pm 16,3 \text{ nm}$. Ces dernières affichent une différence d'amplitude de topographie de plusieurs centaines de nanomètres avec les puces mesurées sans aspiration. De plus, la signature topographique caractéristique du circuit intégré devient difficilement observable. Il apparaît que l'aspiration de la plaque, destinée à son maintien lors de la mesure, a un impact non négligeable sur la topographie mesurée. Cet impact est directement observable sur les cartographies et varie d'une puce à l'autre. Cette variation peut être attribuée à la distribution des trous d'aspiration et à la

présence de particules ou d'imperfections sur le socle. La présence d'aspiration induit des déformations de la plaque qui sont visibles sur la face avant³¹.

Ces résultats montrent qu'en présence d'aspiration la correction de type « ellipsoïdale et inclinaison » n'est pas suffisante.

Il semble donc qu'une mesure sans aspiration et avec une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison » permet de s'affranchir des contributions topographiques indésirables. Les mesures suivantes sont - sauf mention contraire – effectuées dans ces conditions. Les variations nanométriques de la topographie étant désormais observables, il est considéré qu'il ne subsiste pas de contributions topographiques indésirables.

3.3 Etude de la fiabilité de l'algorithme de recollement d'images

Les mesures précédentes ont pu être effectuées par assemblage de 84 champs de vue. Pour cela, les différents champs de vue mesurés présentent une zone de recouvrement, d'un certain pourcentage, avec les champs de vue voisins. La reconstruction de la surface est ensuite assurée par un algorithme propriétaire intégré au logiciel de mesure. Ce dernier peut être une source d'erreur (Figure 2-19).

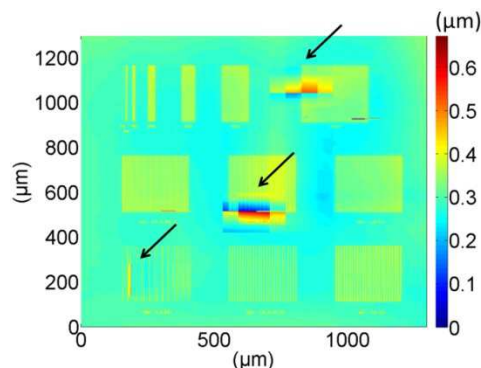


Figure 2-19 : Exemples d'erreurs induites par un mauvais recollement d'images.

³¹ La présence d'un coussin d'air dans la tête de polissage permet de s'affranchir de ce phénomène lors des procédés de polissage mécano-chimique.

Il a été observé au cours des mesures que les paramètres en lien avec le recollement d'images et réglables par l'utilisateur ont très peu d'impact sur la mesure. Seul le pourcentage de la zone de recouvrement entre deux champs de vue peut être critique si celui-ci est trop faible, inférieur à 5%. Une valeur de 10% offre un bon compromis entre temps et erreur de mesure (de l'ordre de l'angström). Il est également possible de choisir le type de recouvrement, zones hautes uniquement, zones basses uniquement, zones planes uniquement ou toutes les zones. C'est ce dernier choix qui a été retenu car il assure un assemblage optimal des images sans augmenter le temps de mesure.

Une fois ces réglages effectués il faut s'assurer de la fiabilité de l'algorithme de recollement d'images. Pour cela, les mesures précédentes sont comparées à des mesures effectuées sans recollement d'images par interférométrie de Fizeau. Cette technique moins résolue latéralement (28 micromètres contre 3,6 micromètres) présente la même résolution nanométrique verticale que le microscope interférométrique évalué. Les différentes mesures sont effectuées sans aspiration de la plaque et avec une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison ».

Il apparaît sur la Figure 2-20 que les signatures topographiques internes aux circuits intégrés sont semblables pour les deux techniques et présentent des amplitudes topographiques comparables. De plus, les amplitudes totales de topographie mesurées sans recollement d'images, $77,7 \text{ nm} \pm 3,9 \text{ nm}$ pour la puce située au centre de la plaque et $62,4 \text{ nm} \pm 3,1 \text{ nm}$ pour la puce située à mi-rayon de la plaque, correspondent aux valeurs obtenues avec recollement d'images, soit, respectivement $73,4 \text{ nm} \pm 3,7 \text{ nm}$ et $60,6 \text{ nm} \pm 3 \text{ nm}$. Les variations de topographie longues distances, plus marquées, visibles pour les mesures effectuées par interférométrie de Fizeau sont attribuées à la résolution latérale élevée (28 micromètres) et son influence sur la correction appliquée.

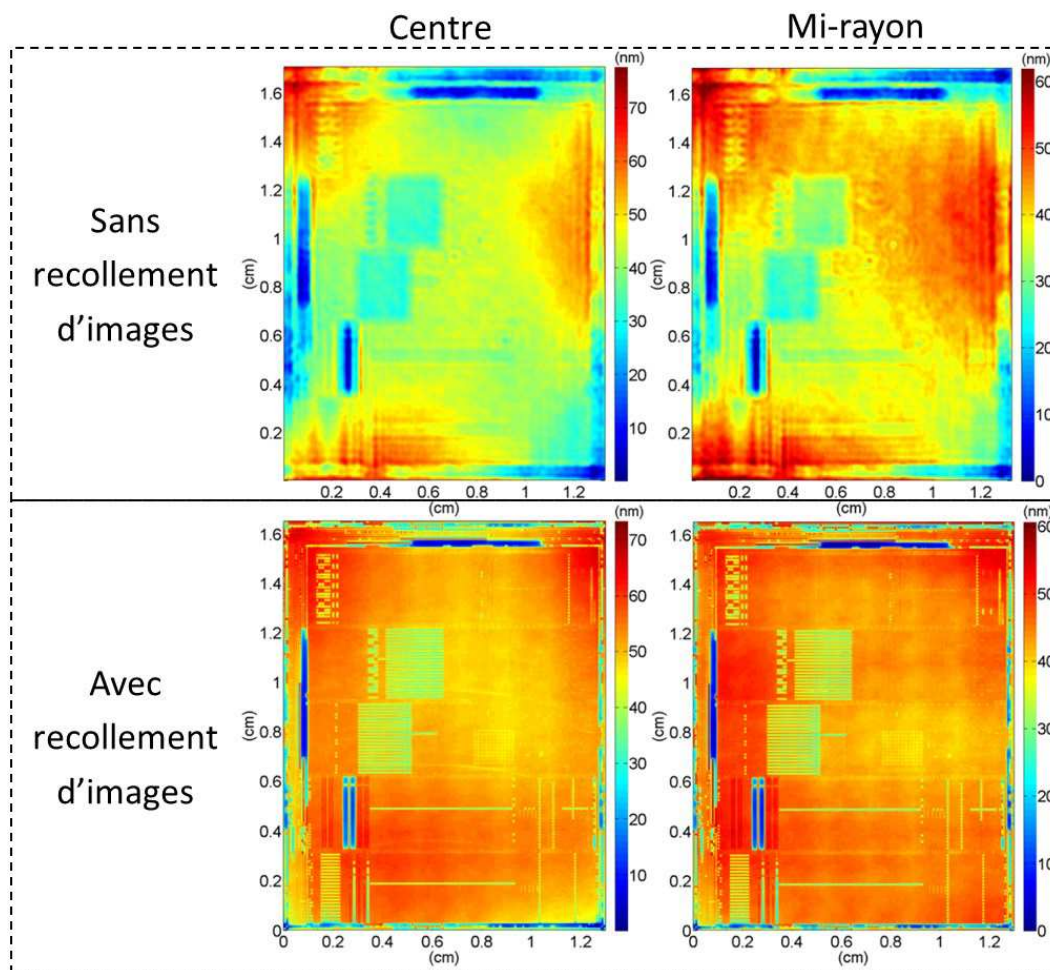


Figure 2-20 : Mesures obtenues par microscopie interférométrique de Fizeau (mode PSI) sans recollement d'images et par microscopie interférométrique de Michelson (mode PSI) avec recollement d'images. Deux puces, situées au centre et à mi-rayon de la plaque sont caractérisées.

En conclusion, dans le cadre de la problématique de la thèse, l'algorithme de recollement d'images est fiable. La mesure de la topographie d'un circuit intégré complet est maintenant accessible. Néanmoins, la justesse de cette mesure doit être vérifiée.

3.4 Développement d'une technique de référence

Il n'existe pas, actuellement, de technique de référence pour cette catégorie de mesure. En effet, ce type de besoin n'a pas été identifié par les instituts et organismes internationaux de métrologie. En conséquence, il n'y a ni appareil, ni technique, ni étalon de référence pour ce

type de mesure. L'objectif de cette section est de pallier à ce manque afin de valider la justesse de la mesure par microscopie interférométrique sur des distances centimétriques. Cette dernière doit présenter la même résolution latérale (micrométrique), la même résolution verticale (nanométrique) et la même capacité à mesurer des surfaces de plusieurs centimètres carrés. Peu de techniques correspondent à ces critères.

La profilométrie mécanique remplit ces conditions et apparaît comme le meilleur compromis. La profilométrie mécanique est considérée comme une technique de référence car elle n'est pas, par sa nature, sujette aux erreurs de mesure provenant de la présence, sur la surface, de matériaux transparents. De plus, cet équipement est étalonné pour la mesure de structures d'une centaine de micromètres de cotés et présentant une topographie de cent nanomètres. Cette technique ne permet toutefois pas de répondre complètement à la problématique de la thèse car la mesure est longue. De plus, la pointe est en contact avec la surface ce qui peut induire des problèmes de contaminations croisées. Dans le cas de la profilométrie mécanique la résolution latérale et l'échantillonnage spatial sont équivalents si ce dernier est supérieur au diamètre de la pointe qui est égal à 100 nanomètres.

La fréquence d'échantillonnage, la vitesse de balayage et la force d'appui de la pointe sont optimisés pour que :

- le bruit de mesure soit faible ;
- la mesure soit la plus rapide possible ;
- la pointe reste en contact avec la surface lors de la mesure et ne l'endommage pas.

La mesure en trois dimensions est réalisée par une suite de mesures en deux dimensions. L'aspiration de la plaque est désactivée comme pour les précédentes mesures. Les données brutes sont traitées à l'aide du logiciel MATLAB car l'interface équipement n'est pas du tout adaptée à ce type d'application, tant au niveau de l'affichage, qu'au niveau des corrections disponibles pour la mise à plat des données topographiques (uniquement de type « inclinaison »). En effet, la profilométrie mécanique est généralement utilisée, pour des mesures en deux dimensions, de structures d'une centaine de micromètres de long.

Une première série de mesures est effectuée sur deux puces, situées au centre et à mi-rayon de la plaque. La résolution latérale en x est de 2 micromètres. La résolution latérale en y (ou espacement entre les différents profils) est de 810 micromètres. Cette valeur élevée a été choisie pour réduire le temps de la mesure, 2 minutes et 13 secondes pour un scan de 1,3 cm, soit ≈ 45 minutes pour une puce.

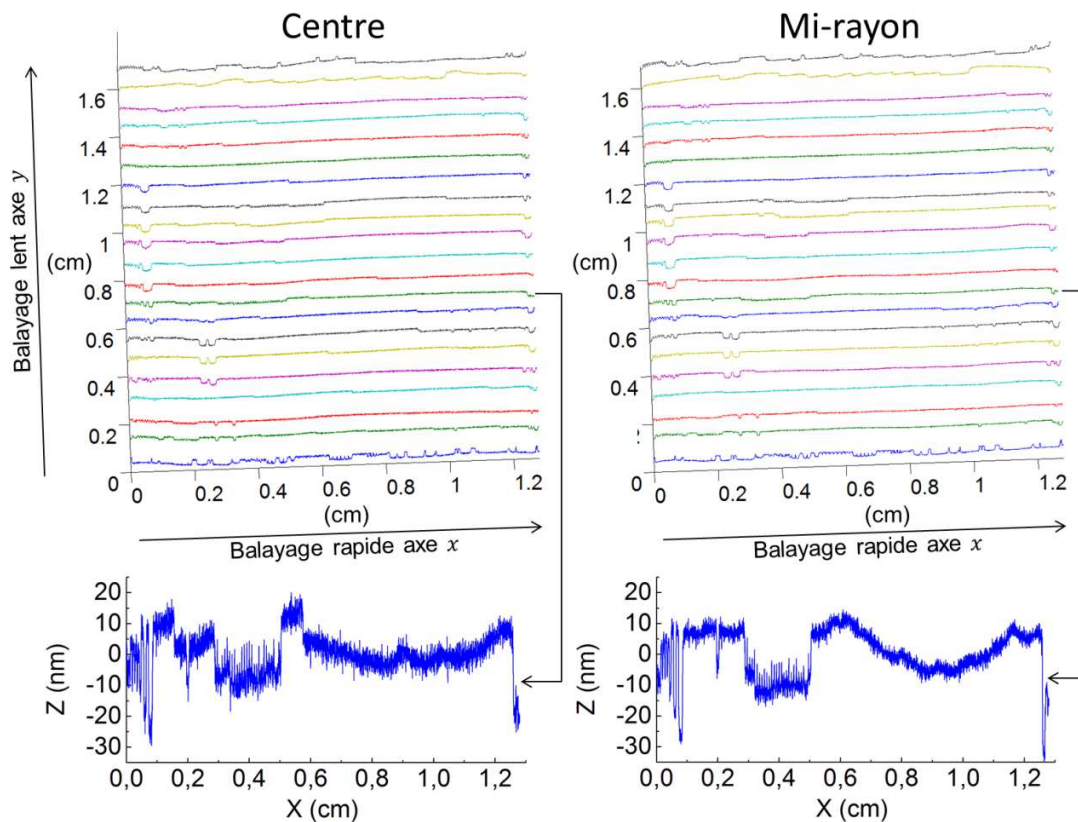


Figure 2-21 : Mesures effectuées par profilométrie mécanique de la topographie de deux puces, situées au centre et à mi-rayon de la plaque. Une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison en 2D » est appliquée indépendamment pour chaque profil. La partie basse de la figure correspond à deux profils issus de la puce.

La qualité des mesures obtenues à partir de ces conditions expérimentales est observée sur la Figure 2-21. Le bruit et le temps de la mesure sont faibles, suffisamment dans le cas du bruit pour observer les variations nanométriques de topographie. Aucun rebond de la pointe n'est observé. Une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison » a été appliquée indépendamment sur chaque profil.

La correction appliquée aux données brutes doit être de type « ellipsoïdale et inclinaison en 3D » pour que les conditions de mesure soient identiques à celles utilisées en microscopie interférométrique. La programmation des algorithmes de correction (effectuée sous MATLAB) nécessite pour cela une résolution latérale en x et en y identique. Pour des raisons de « capacité mémoire » il n'est pas possible de choisir une résolution latérale, en x et en y , inférieure à 20 micromètres. Dans ces conditions la mesure d'une puce de 2,15 cm² représente 825 traces selon l'axe x , composée chacune de 641 points, soit un total 528 825 points. Le temps de la mesure est important, 8 heures et 45 minutes. Ce dernier laisse craindre une dérive des conditions de mesure au cours de cette dernière.

Les résultats de deux mesures pour ces conditions expérimentales et une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison en 3D » sont présentés sur la Figure 2-22.

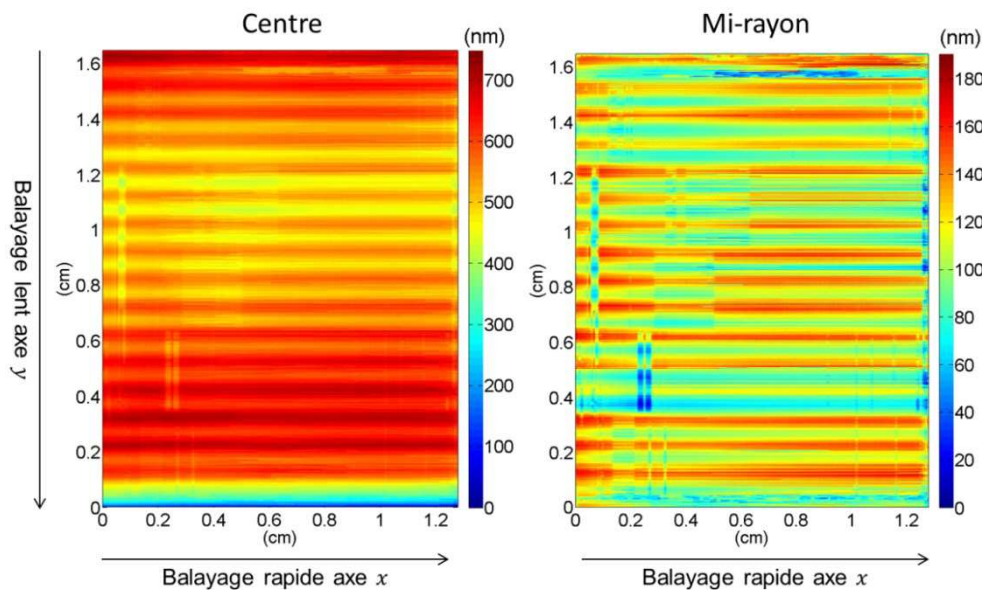


Figure 2-22 : Mesures obtenues par profilométrie mécanique de la topographie de deux puces, situées au centre et à mi-rayon de la plaque. Une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison en 3D » est appliquée.

Aucune intrapolation ou extrapolation des données expérimentales n'a été faite durant la reconstruction, à partir des profils en deux dimensions, des images en trois dimensions. Les mesures ne sont pas exploitables. Une nouvelle série de mesures confirme cette observation.

Les données topographiques brutes, sans corrections, sont reportées sur la Figure 2-23.

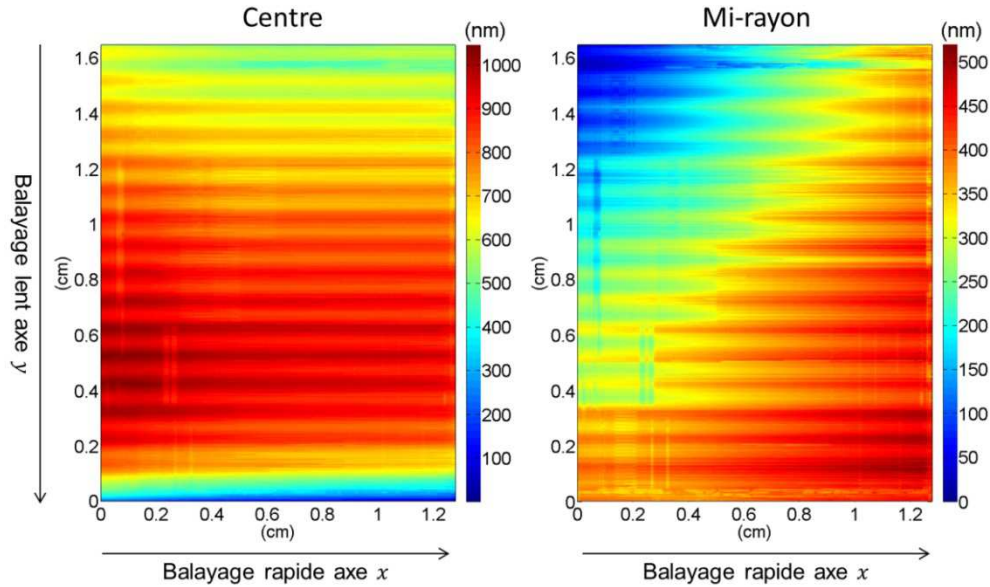


Figure 2-23 : Mesures obtenues par profilométrie mécanique de la topographie de deux puces, situées au centre et à mi-rayon de la plaque. Aucune correction n'est appliquée.

Plusieurs contributions topographiques parasites sont observables. Elles sont attribuées à la durée de la mesure au cours de laquelle l'environnement et les perturbations qui y sont associées évoluent. Une d'entre elles est périodique. La Figure 24 montre deux profils topographiques, suivant l'axe y , extraits des données présentées Figure 2-22.

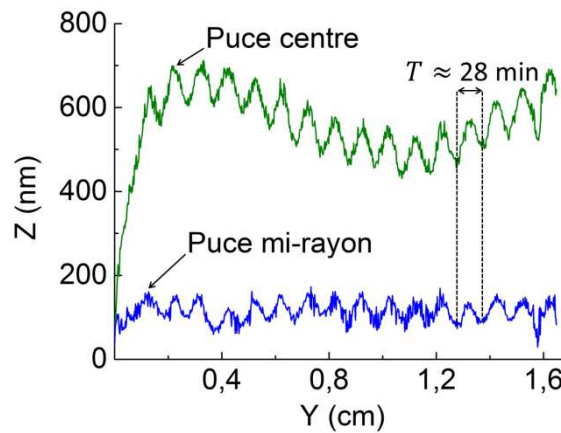


Figure 24 : Profils topographiques (y, z) , extraits des mesures des topographies de deux circuits intégrés obtenues par profilométrie mécanique (présentées Figure 2-22). La période temporelle de la perturbation environnementale périodique est calculée.

Il apparaît que la période temporelle de la perturbation périodique est égale à 28 minutes. La complexité de l'environnement de la salle blanche ne permet pas d'identifier son origine, il n'est donc pas possible de la supprimer. Cette évolution de l'environnement conduit à des conditions de mesure différentes pour chaque profil, ce qui rend ces derniers indépendants les uns des autres. Dans ce contexte l'utilisation d'une correction en 3D n'est pas pertinente.

Une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison en 2D » est appliquée afin de reproduire de la manière la plus fidèle les conditions de mesure utilisées en microscopie interférométrique. Le résultat est reporté sur la Figure 2-25.

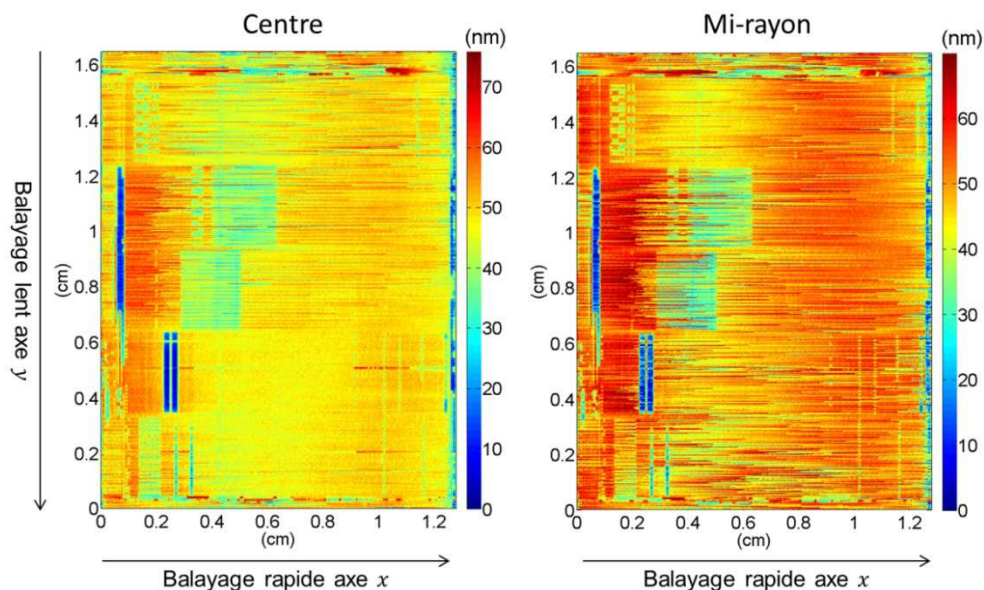


Figure 2-25 : Mesures obtenues par profilométrie mécanique de la topographie de deux puces, situées au centre et à mi-rayon de la plaque. Une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison en 2D » est appliquée. La puce située au centre de la plaque a été mesurée durant la nuit, la puce située à mi-rayon de la plaque a été mesurée en journée.

De fortes incohérences entre les différents profils sont visibles sur les cartographies. Elles sont attribuées aux fortes perturbations environnementales durant la mesure. Néanmoins, le nombre important de points composant la cartographie permet d'exploiter la mesure. Une mesure spatialement résolue (20 μm) de la nano-topographie d'une puce par profilométrie mécanique apparaît délicate mais possible.

La durée d'acquisition des données ne permet pas d'évaluer la répétabilité et la reproductibilité de ce type de mesure. La répétabilité et la reproductibilité sont donc évaluées à partir de données générées dans les conditions expérimentales donnant lieu à 21 scans espacés de 810 micromètres (Figure 2-21). Dans ces conditions, l'incertitude globale de mesure est égale à 12 nm. La difficulté d'utilisation de la profilométrie mécanique pour ce type d'application est illustrée par cette valeur.

Il apparaît que la caractérisation par profilométrie mécanique de la nano topographie d'un circuit intégré est difficile à mettre en œuvre. Néanmoins, cette dernière peut fournir une mesure « exploitable » sous certaines conditions contraignantes. Ceci nécessite un temps de mesure important rendant l'équipement indisponible. De plus, la mesure doit être effectuée dans des conditions environnementales optimales. Pour cela un minimum d'activités humaines et équipements est requis.

Dans ce contexte, la profilométrie mécanique est utilisable en tant que technique de référence vis-à-vis de mesures optiques de la nano-topographie sur des distances centimétriques.

3.5 Evaluation de la justesse de la mesure

La profilométrie mécanique permet donc d'évaluer la justesse des mesures effectuées par microscopie interférométrique. Dans un premier temps, la justesse de la mesure de l'amplitude de la topographie à l'échelle d'une structure est évaluée. Pour cela quatre zones identifiées sur la Figure 2-26 sont utilisées.

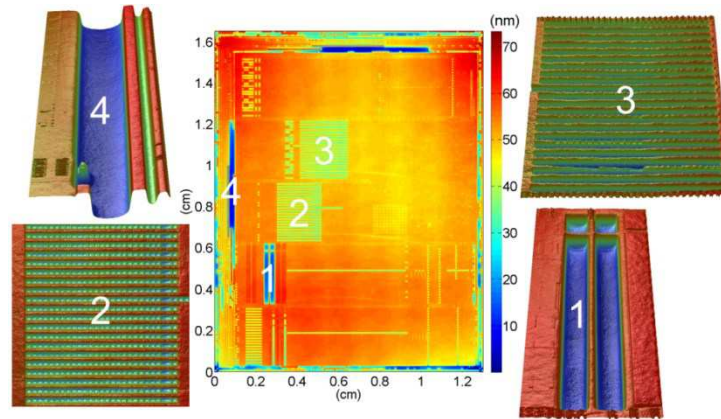


Figure 2-26 : Illustration des quatre zones utilisées pour évaluer la justesse de la mesure de la topographie d'une structure par microscopie interférométrique.

Les valeurs de l'amplitude de topographie de ces quatre zones mesurées par : profilométrie mécanique ; interférométrie de Fizeau et interférométrie de Michelson en mode PSI sont reportées sur la Figure 2-27. La faible topographie des circuits intégrés ne permet pas d'effectuer les mesures par profilométrie mécanique après le dépôt de la couche de tantale. Ceci est dû à la forte réflectivité de cette dernière qui empêche la localisation des sites de mesure. Dans ce contexte, les mesures par profilométrie mécanique sont effectuées avant le dépôt de cette couche. Les résultats présentés dans la section 3.1 ont montré que cette dernière n'a aucun impact sur la topographie sous-jacente.

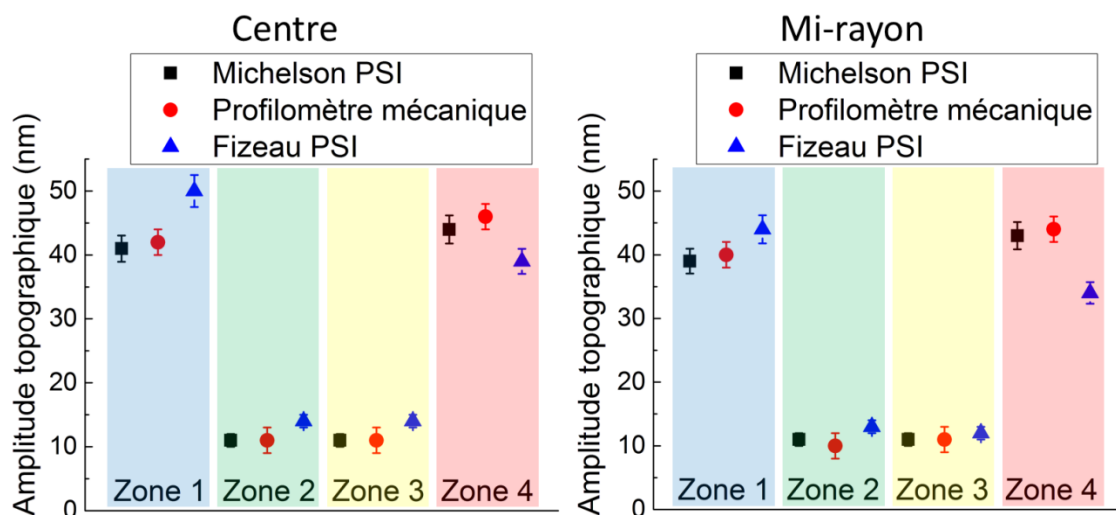


Figure 2-27 : Amplitudes de la topographie de quatre zones (Figure 2-26) mesurées dans deux puces situées au centre et à mi-rayon de la plaque. Différentes techniques sont utilisées.

Les valeurs obtenues par interférométrie de Michelson en mode PSI sont justes. De faibles écarts entre les valeurs obtenues par interférométrie de Fizeau en mode PSI et les valeurs de références sont visibles. Ces écarts sont attribués à la différence de résolution latérale (28 micromètres pour l'interféromètre de Fizeau contre 100 nanomètres pour la profilométrie mécanique).

Dans un second temps, les valeurs des amplitudes topographiques des deux circuits intégrés précédents sont reportées sur la Figure 2-28. Les différentes techniques fournissent des valeurs comparables à celles générées par la technique de référence.

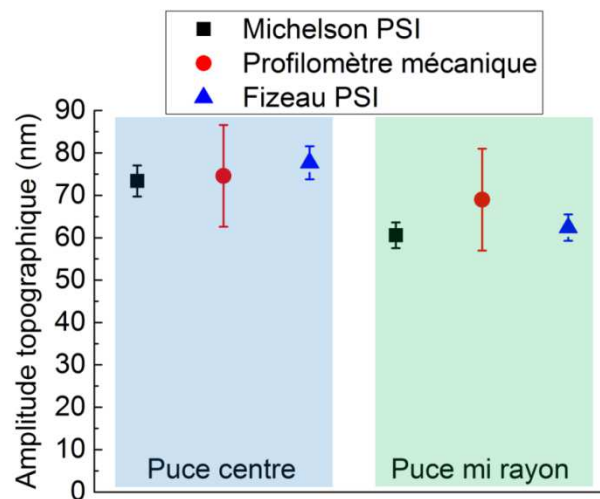


Figure 2-28 : Amplitudes des topographies de deux puces, situées au centre et à mi-rayon de la plaque, mesurées par différentes techniques de caractérisation.

En conclusion, la caractérisation, par microscopie interférométrique, de la nano topographie d'une surface de 2,15 cm² est désormais possible.

Parmi les différentes problématiques investiguées jusqu'ici, seule celle des contributions topographiques indésirables est dépendante de la taille de la surface caractérisée. Dans ce contexte, cette dernière doit être de nouveau abordée afin de permettre l'utilisation de la technique quelle que soit la taille du circuit intégré.

3.6 Mise à plat des données topographiques

La mesure de la topographie d'un circuit intégré dont la surface est égale à $8,6 \text{ cm}^2$ est reportée sur la Figure 2-29. Une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison en 3D » est appliquée sur les données topographiques brutes. La mesure est effectuée sans aspiration.

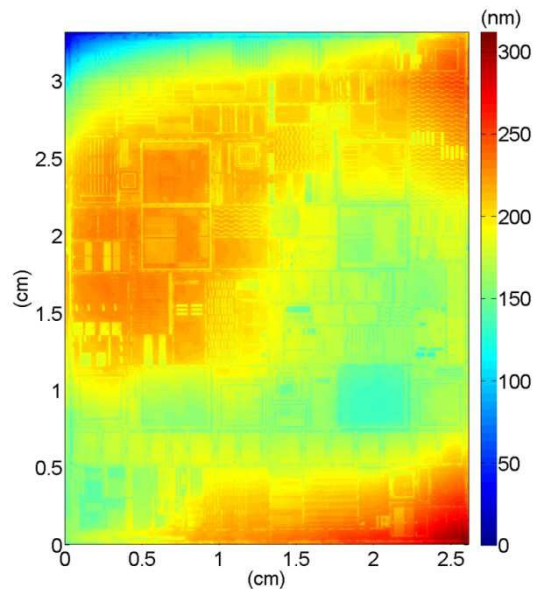


Figure 2-29 : Mesure obtenue par microscopie interférométrique de la topographie d'un circuit intégré de $8,6 \text{ cm}^2$. L'aspiration de la plaque est désactivée et une correction de type « ellipsoïdale et inclinaison en 3D » est appliquée.

Il apparaît que la correction utilisée pour la mise à plat des données topographiques n'est pas suffisante pour des puces de cette taille. Ce type de phénomène est courant et il existe plusieurs façons de s'en affranchir :

- procéder à un ajustement polynomial habituellement d'ordre 1 à 3 et soustraire le résultat de l'ajustement des données brutes. Ceci peut être fait sur l'ensemble des données ou seulement sur des zones spécifiées manuellement par l'utilisateur. La correction de type « ellipsoïdale et inclinaison » est un ajustement polynomial d'ordre 2 ;
- filtrer directement les fréquences des contributions topographiques indésirables dans l'espace des fréquences.

L'ajustement consiste à déterminer les coefficients d'une équation caractérisant une forme géométrique de manière à ce que cette forme se rapproche le plus possible des données topographiques. Cet ajustement se fait dans la plupart des cas par la méthode des moindres carrés. Il s'agit de diminuer la somme des carrés des distances entre les points générés par l'ajustement et les points correspondant aux données à ajuster. Ainsi, un ajustement polynomial a pour but de déterminer les coefficients ($a_0, a_1, a_2 \dots$) de l'équation :

- en 2D, $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$; en deux dimensions, un polynôme de degré 1 correspond à une droite ;
- en 3D, $f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + \dots + a_nx^ny^n$; en trois dimensions, un polynôme de degré 1 correspond à un plan.

Ces méthodes ne fonctionnent pas lorsque la surface présente des motifs dont l'amplitude topographique est nanométrique et que la taille de l'image acquise est grande (supérieure à un millimètre en deux dimensions et supérieure un millimètre carré en trois dimensions). En effet, la Figure 2-30 montre que l'ajustement ne se fait pas seulement sur les contributions topographiques indésirables mais également sur les motifs que l'on veut caractériser.

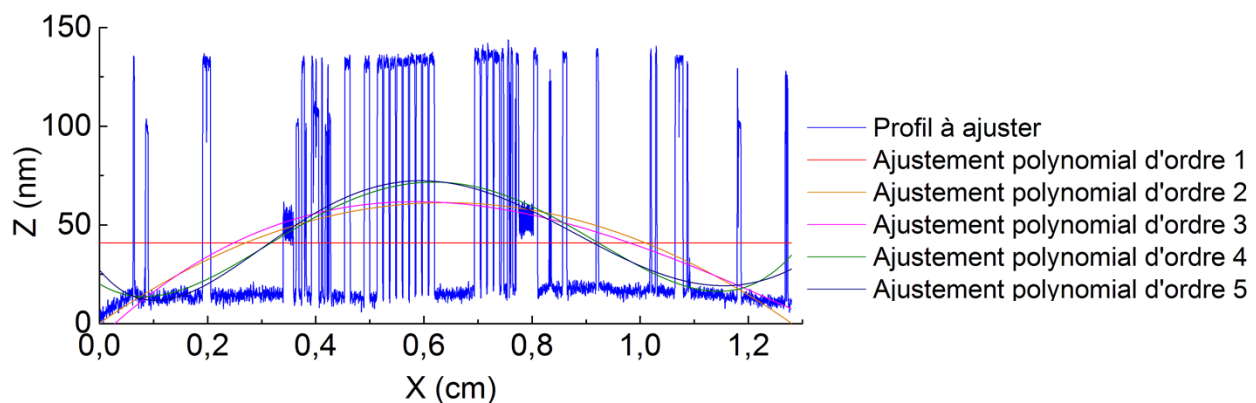


Figure 2-30 : Illustration de la limite de la méthode de mise à plat des données par ajustement polynomial en présence de motifs.

De plus, la sélection manuelle des zones à ajuster n'est pas possible car elles sont trop nombreuses et trop petites. Le filtrage en fréquence des contributions topographiques

indésirables est également inapplicable car les longueurs d'onde de ces contributions peuvent être égales à celles des motifs. Des méthodes moins connues et plus spécifiques existent (Jiang, Scott et al. 2008; Whitehouse 2011; Giusca, Leach et al. 2012). Néanmoins, la présence de motifs sur la surface rend ces dernières inutilisables.

Une nouvelle méthode de mise à plat des données topographiques, mise en œuvre à l'aide du logiciel Matlab a été développée durant ce travail de thèse. Cette dernière est basée sur l'utilisation d'un filtre en hauteur dont l'objectif est de diminuer le poids des motifs. Après suppression des motifs, un ajustement polynomial est réalisé sur les données topographiques. Les coefficients du polynôme d'ajustement sont ensuite utilisés pour effectuer la mise à plat des données topographiques avant le filtrage des motifs. Cette méthodologie permet la mise à plat de données topographiques sur des distances centimétriques sans être impacté par la présence de motifs. L'efficacité de la méthode³² est illustrée sur la Figure 2-31. Un exemple en deux dimensions est privilégié afin de permettre une meilleure visualisation de l'efficacité de la méthode de mise à plat développée.

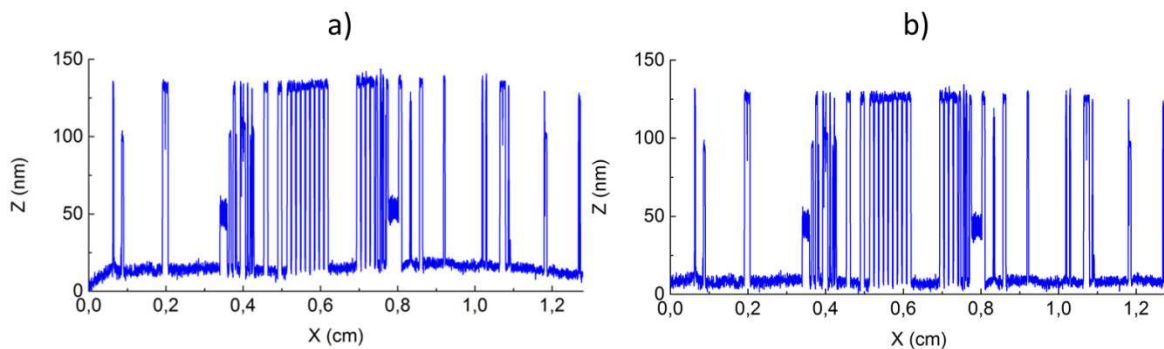


Figure 2-31 : Comparaison de l'efficacité de : a) la méthode classique de mise à plat des données topographiques ; b) la méthode de mise à plat des données topographiques développée durant ce travail de thèse.

Cette méthode permet de supprimer l'impact de l'aspiration de la plaque mise en évidence dans la section 3.2. Ce résultat est de première importance car dans un contexte de production,

³² Un descriptif complet, de la méthode de mise à plat des données topographiques développée, est présenté dans l'annexe 1.

l'aspiration de la plaque est obligatoire afin de diminuer les risques de bris de plaques. En effet, ces derniers peuvent conduire à l'arrêt d'un équipement et fortement impacter la cadence de production.

En conclusion, cette méthode permet de s'affranchir des contributions topographiques indésirables quelle que soit la taille de la zone caractérisée.

3.7 Evaluation d'une méthodologie de mesure alternative

Cette section est consacrée à l'étude d'un protocole de mesure alternatif basé sur l'utilisation d'un équipement industriel. Les résultats présentés durant cette section ont été générés dans le cadre d'une collaboration avec l'équipementier NanometricsTM. L'équipement utilisé est un Unifire³³. C'est un équipement totalement automatisé, contrairement aux microscopes interférométriques utilisés durant ce travail de thèse. Ainsi, le chargement, déchargement et alignement de la plaque, la mise au point, la reconnaissance de motifs et la mesure sont automatiques. Il est également équipé d'un mini environnement permettant d'isoler les plaques de l'extérieur et des contaminations d'origine humaine. Les données sont générées à partir d'un objectif interférométrique de type Michelson fournissant une taille de champ de vue de 4,6 millimètres par 6,2 millimètres et une résolution latérale égale à 9,6 micromètres. Les mesures sont effectuées en mode « interférométrie à balayage vertical » et avec aspiration de la plaque. Le traitement des données topographiques brutes est réalisé dans l'espace des phases. L'équipementier n'a pas souhaité donner plus d'explications en raison de problèmes de confidentialité et d'enjeux économiques importants.

La Figure 2-33 montre le résultat de la mesure de deux puces, situées au centre et à mi-rayon de la plaque. Cette approche est nommée « Michelson VSI » et l'approche développée dans les sections précédentes est nommée « Michelson PSI ». Les données issues de l'approche développée durant ce travail de thèse sont traitées à l'aide de la méthode de mise à plat des données présentée dans la section 3.6.

³³ <http://www.nanometrics.com/products/unifire.html>

Les amplitudes de la topographie de quatre zones, caractérisées par différentes techniques dans la section 3.5, sont reportées Figure 2-32 et comparées aux valeurs mesurées par l'approche « Michelson VSI ». L'approche Michelson VSI fournit des valeurs équivalentes à la technique de référence.

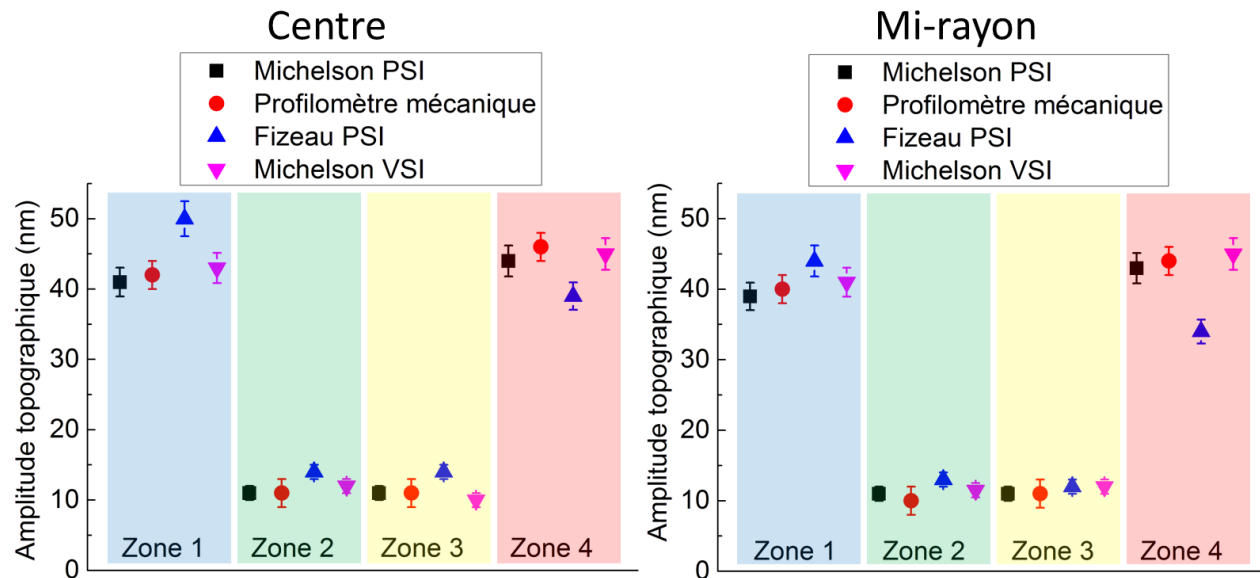


Figure 2-32 : Amplitudes de la topographie de quatre zones (Figure 2-26) mesurées dans deux puces, situées au centre et à mi-rayon de la plaque. Différentes techniques sont utilisées.

La Figure 2-33 montre que le traitement, dans l'espace des phases, des données topographiques brutes permet de s'affranchir de toutes les contributions topographiques indésirables. Les amplitudes totales de la topographie des puces, 57,1 nm et 56,2 nm, pour l'approche Michelson VSI et 56,3 nm \pm 2,8 nm et 55,8 nm \pm 2,8 nm pour l'approche Michelson PSI sont semblables.

Ces résultats montrent qu'une caractérisation spatialement résolue de la nano-topographie sur des distances centimétriques est accessible par différents modes de mesure interférométrique et différentes méthodologies. Il apparaît également que des équipements industriels sont dotés des outils nécessaires pour répondre à la problématique de la thèse.

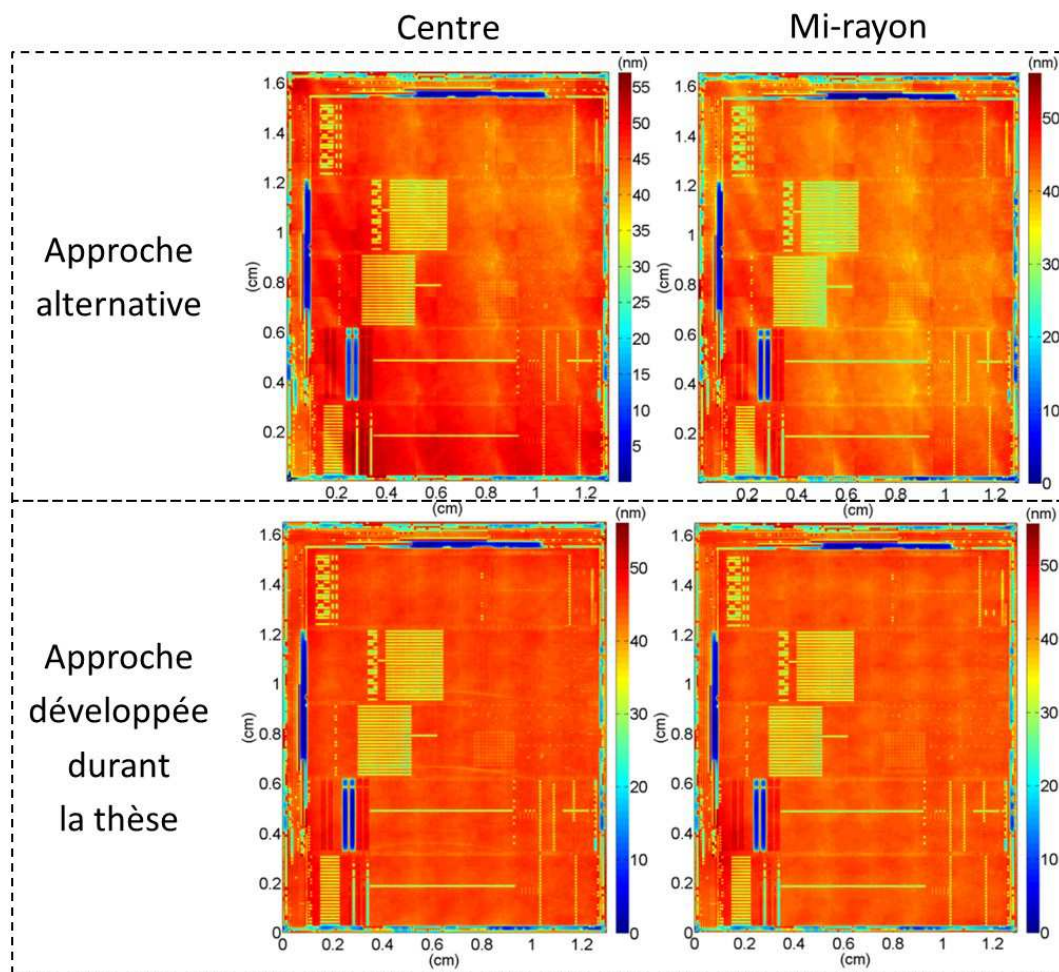


Figure 2-33 : Mesures obtenues par microscopie interférométrique et basées sur l'approche alternative, Michelson VSI, avec aspiration de la plaque et traitement des données topographiques dans l'espace des phases et l'approche développée durant ce travail de thèse, Michelson PSI, sans aspiration de la plaque et avec méthode de mise à plat des données topographiques présentée section 3.6. Deux circuits intégrés, situés au centre et à mi-rayon de la plaque sont caractérisés.

Néanmoins, l'obtention des résultats présentés dans cette section a nécessité une collaboration de plus d'un an, initiée dans le cadre de cette thèse. Cette association s'est effectuée sous la forme de conférences téléphoniques mensuelles, d'échanges de données et d'envois de plaques. Elle a donné lieu à une publication commune, récompensée, et a principalement permis d'éprouver l'efficacité du mode de mesure VSI et plus généralement de la technique sur un équipement de type industriel. Pour cela, le travail effectué sur le dépôt de la couche de tantale ainsi que l'accès à une technique de référence ont été indispensables. L'envoi de plaques avec

et sans dépôt de tantale a également permis de travailler sur les erreurs de mesure provenant de la présence, sur la surface, de matériaux transparents. La connaissance des caractéristiques des différentes couches présentes sur la surface a été d'une grande aide pour l'équipementier. Cette collaboration est actuellement toujours en cours.

Il est important de préciser que les incertitudes de mesure locales de l'équipement « industriel/Michelson VSI » prennent en compte les erreurs de mesure dues à une collaboration longue distance. De tels outils présentent dans des conditions classiques de fonctionnement une incertitude de mesure plus faible. La valeur de l'incertitude de mesure de l'amplitude de topographie totale du circuit intégré n'a pas pu être générée au cours de la collaboration.

Dans un contexte industriel l'efficacité d'une technique ou d'un équipement n'est pas le seul facteur important.

3.8 Etude du temps de la mesure

Le temps de procédé/mesure est également un facteur important en industrie. Plusieurs paramètres ont un impact sur ce dernier. La Figure 2-34 représente la durée de la mesure, en fonction de ces paramètres, pour deux tailles de puce. Le temps indiqué correspond à la durée d'acquisition des différents champs de vue individuels³⁴, et au temps nécessaire pour effectuer le recollement de ces champs de vue. Il ne prend pas en compte la durée du chargement/déchargement de la plaque, des réglages et de la mise à plat des données topographiques.

On observe que le temps de la mesure est allongé de 69% lorsque la mise au point automatique est activée. La rapidité de la mise au point automatique est aujourd'hui un élément important pour le choix d'un équipement. L'analyse topographique de grandes zones nécessite l'utilisation

³⁴ En mode PSI qui est basé sur un décalage mécanique de la phase et l'utilisation d'un l'algorithme « à quatre sauts discrets » (voir section 1.2 de ce chapitre).

d'une auto focalisation ; en effet, dans ce cas, la déformation de la plaque conduit à une sortie de la zone de profondeur de champ et donc à une absence d'interférences. L'aspiration de la plaque permet de s'affranchir de telles déformations et par conséquent de la mise au point automatique à chaque champ de vue. Il est donc important de pouvoir s'affranchir des contributions topographiques indésirables provenant de la tenue de la plaque par aspiration. La méthode de mise à plat des données proposée offre cette possibilité et permet donc de réduire le temps de la mesure.

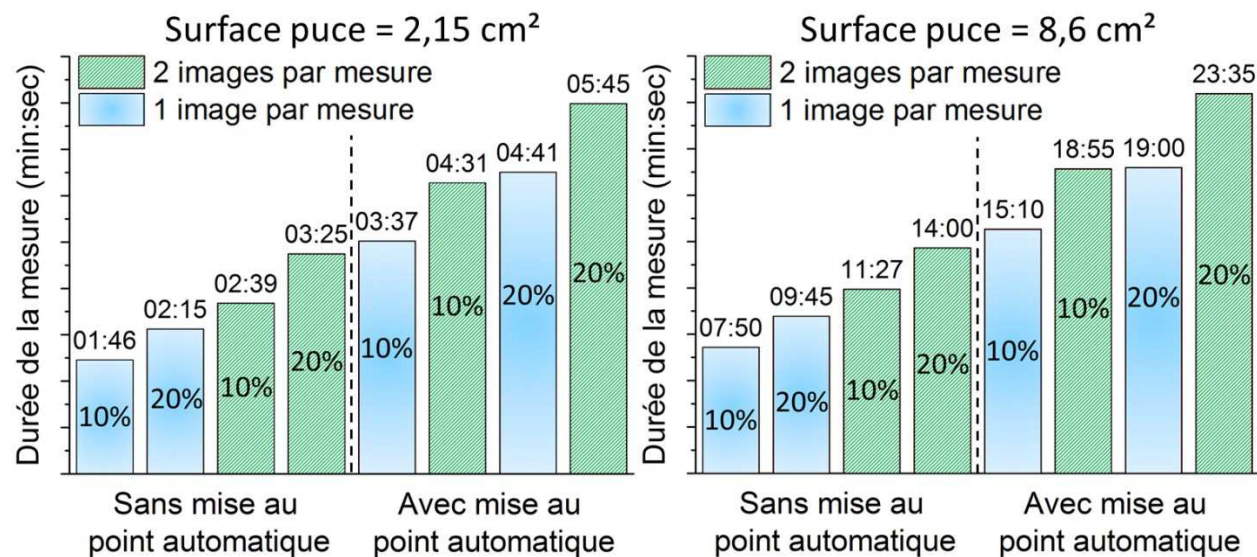


Figure 2-34 : Durée de la mesure en mode PSI en fonction du nombre d'images moyennées par mesure, du pourcentage de la zone de recouvrement (indiqué dans les barres) et de la présence ou de l'absence de mise au point automatique. Deux tailles de puce égales à 2,15 cm² et 8,6 cm² sont adressées. La puce de 2,15 cm² nécessite 66 champs de vue individuels lorsque le pourcentage de recouvrement est égal à 10% et 84 lorsqu'il est égal à 20%. La puce de 8,6 cm² nécessite 273 champs de vue individuels lorsque le pourcentage de recouvrement est égal à 10% et 336 lorsqu'il est égal à 20%.

Le pourcentage de recouvrement, des champs de vue, utilisé dans l'algorithme de recollement d'images et le nombre des mesures moyennées ont également un impact sur le temps du procédé. Une extension de 10% de la zone de recouvrement d'images augmente le temps de mesure de 25%. L'ajout d'une image au total des images moyennées induit un allongement de la durée du procédé de 25% à 50%. Le choix de ces paramètres repose sur un compromis entre temps et erreur de mesure.

IV. Conclusions

L'utilisation de la microscopie interférométrique pour une caractérisation spatialement résolue ($3,6\ \mu\text{m}$) de la nano-topographie sur des distances centimétriques a été étudiée. Les différentes limitations de cette technique ont été identifiées et résolues :

- les erreurs de mesure induites par la présence, sur la surface, de matériaux transparents ont été supprimées en déposant une couche de tantale ;
- les contributions topographiques indésirables ont été discutées et une méthodologie a été mise en place pour les éliminer ;
- la fiabilité de l'algorithme de recollement d'images a été démontrée ;
- une nouvelle méthode de mise à plat des données, spécifiquement développée pour des surfaces de plusieurs centimètres carrés et présentant des motifs, a été proposée ;
- la justesse de la mesure a été vérifiée, à plusieurs échelles, à l'aide de la profilométrie mécanique choisie comme technique référence. Cette dernière a fait l'objet d'une étude approfondie pour permettre son utilisation comme technique de référence, dans le cadre d'une caractérisation spatialement résolue de la nano-topographie sur des distances centimétriques.

Il a été montré dans le cadre d'une collaboration, initiée durant cette thèse, avec l'équipementier NanometricsTM, que des équipements compatibles avec les normes SEMI et actuellement prêts à être installés dans des lignes de production sont dotés des outils nécessaires pour répondre à la problématique de la thèse. La reproductibilité et la répétabilité de la mesure ont été analysées. Ces dernières, évaluées dans un contexte de recherche et de développement semblent adaptées à une utilisation industrielle de la technique. Dans ce contexte, la microscopie interférométrique peut fournir, à l'industrie microélectronique, une technique de caractérisation spatialement résolue ($3,6\ \mu\text{m}$) de la nano-topographie sur des distances centimétriques, rapide (10 à 20 minutes pour $9\ \text{cm}^2$), non destructive et actuellement non disponible.

Bibliographie

- ASTM-International (2002). F 534-02 Standard Test Method for Bow of Silicon Wafers.
- Born, M. and E. Wolf (1999). Principles of optics : electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Cambridge ; New York, Cambridge University Press.
- Caber, P. J. (1993). "Interferometric profiler for rough surfaces." Appl. Opt. **32**(19): 3438-3441.
- Daubechies, I. (1992). Ten lectures on wavelets. Philadelphia, Pa., Society for Industrial and Applied Mathematics.
- de Groot, P. and X. C. de Lega (2004). "Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy." Applied Optics **43**(25): 4821-4830.
- de Groot, P. and X. C. de Lega (2007). "Angle-resolved three-dimensional analysis of surface films by coherence scanning interferometry." Optics Letters **32**(12): 1638-1640.
- de Groot, P. J. and X. C. de Lega (2008). "Transparent film profiling and analysis by interference microscopy." 2008 SPIE proceedings, Interferometry XIV: Applications, **7064**, 70640I.
- de Lega, X. C. and P. J. de Groot (2008). "Characterization of materials and film stacks for accurate surface topography measurement using a white-light optical profiler." 2008 SPIE proceedings, Optical Micro- and Nanometrology in Microsystems Technology II, **6995**, 69950P.
- Debnath, S. K., S. W. Kim, et al. (2010). "Spectrally resolved phase-shifting interference microscopy: technique based on optical coherence tomography for profiling a transparent film on a patterned substrate." Applied Optics **49**(34): 6624-6629.
- Freischlad, K. and C. L. Koliopoulos (1990). "Fourier Description of Digital Phase-Measuring Interferometry." Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision **7**(4): 542-551.
- Freischlad, K., S. H. Tang, et al. (2007). "Interferometry for wafer dimensional metrology." 2007 SPIE proceedings, Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies III, **6672**, 667202.
- Ghim, Y. S. and S. W. Kim (2009). "Spectrally resolved white-light interferometry for 3D inspection of a thin-film layer structure." Applied Optics **48**(4): 799-803.

- Giusca, C. L., R. K. Leach, et al. (2012). "Calibration of the scales of areal surface topography-measuring instruments: part 1: Measurement noise and residual flatness." Measurement Science & Technology **23**(3), 035008.1-035008.10.
- Hariharan, P. (1992). Basics of interferometry. Boston, Academic Press.
- Hibino, K., B. F. Oreb, et al. (1996). "Phase shifting algorithms for nonsinusoidal signals compensating nonlinear phase-shift errors and their susceptibility to random noise." 17th Congress of the International Commission for Optics: Optics for Science and New Technology, Pts 1 and 2 **2778**: 235-236.
- Jiang, X., P. Scott, et al. (2008). "Wavelets and their applications for surface metrology." Cirp Annals-Manufacturing Technology **57**(1): 555-558.
- Kitagawa, K. (2004). "3-d profiling of a transparent film using white-light interferometry." SICE 2004 Annual Conference, Vols 1-3: 585-590.
- Koliopoulos, C. L., S. Forbes, et al. (1981). "Interferometric Microscope for Surface-Analysis." Journal of the Optical Society of America **71**(12): 1591-1592.
- Larkin, K. G. (1996). "Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry." Journal of the Optical Society of America **13**(4): 832-843.
- Leach, R. (2011). Optical methods for areal surface texture measurement. New York, Springer.
- Montgomery, P. C. and J.-P. Fillard (1993). "Peak fringe scanning microscopy: submicron 3D measurement of semiconductor components." 1993 SPIE proceedings, Interferometry: Techniques and Analysis, **1755**, 12-23.
- Novak, J., P. Novak, et al. (2008). "Multi-step phase-shifting algorithms insensitive to linear phase shift errors." Optics Communications **281**(21): 5302-5309.
- Surrel, Y. (1996). "Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping." Applied Optics **35**(1): 51-60.
- Valley, J. F., C. L. Koliopoulos, et al. (2001). "Interferometric metrology of wafer nanotopography for advanced CMOS process integration." Optical Metrology Roadmap for the Semiconductor, Optical, and Data Storage Industries **4449**: 160-168.
- Whitehouse, D. J. (2011). Handbook of surface and nanometrology. Boca Raton, CRC Press.

Ce chapitre met en avant les intérêts et la méthodologie d'une caractérisation spatialement résolue ($3,6\text{ }\mu\text{m}$) de la nano-topographie, induite par les procédés de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques. La représentativité, vis-à-vis de la topographie de la puce, des mesures historiques effectuées dans les boîtes de mesure, est étudiée. La méthodologie associée à la mesure de la nano-topographie d'un circuit intégré est présentée, détaillée et discutée. De nouvelles grandeurs, liées à ce nouveau type de caractérisation, sont introduites et leurs pertinences sont montrées. Une discussion sur la topographie induite par les étapes de polissage est menée. Enfin, la topographie cumulée du circuit intégré est caractérisée après différents étapes de polissage mécano-chimique.

Chapitre 3 : Intérêts et méthodologie d'une caractérisation spatialement résolue de la nano-topographie sur des distances centimétriques : application au polissage mécano-chimique

Les résultats présentés dans le chapitre 2 montrent que la microscopie interférométrique est capable de caractériser la nano-topographie sur des distances centimétriques. Ce chapitre montre l'intérêt de ce nouvel outil de métrologie. La méthodologie associée est également décrite. En effet, les paramètres fournis par les normes ISO relatives³⁵ à ce type de métrologie ne sont pas suffisants pour notre étude.

Comme cela a été montré durant le chapitre 2, l'un des principaux points forts de la microscopie interférométrique est sa résolution spatiale élevée vis-à-vis de la taille de la surface caractérisée. Ainsi, la mesure d'une puce de 8,7 cm² génère 64 millions de points, soit 30 fois le nombre de points contenu dans une image haute définition (1920 pixels par 1080 pixels). Ainsi, cette technique permet de caractériser les procédés de CMP en effectuant les mesures dans les boîtes de test, mais, en effectuant les mesures à l'échelle de la puce, la microscopie interférométrique fournit également une quantité importante de nouvelles informations

³⁵ Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : ISO 25178 ; Méthode d'extraction et de filtrage ISO 16610.

topographiques. Comme le montre la Figure 3-1, il est par exemple possible d'extraire l'amplitude de topographie³⁶ de la puce.

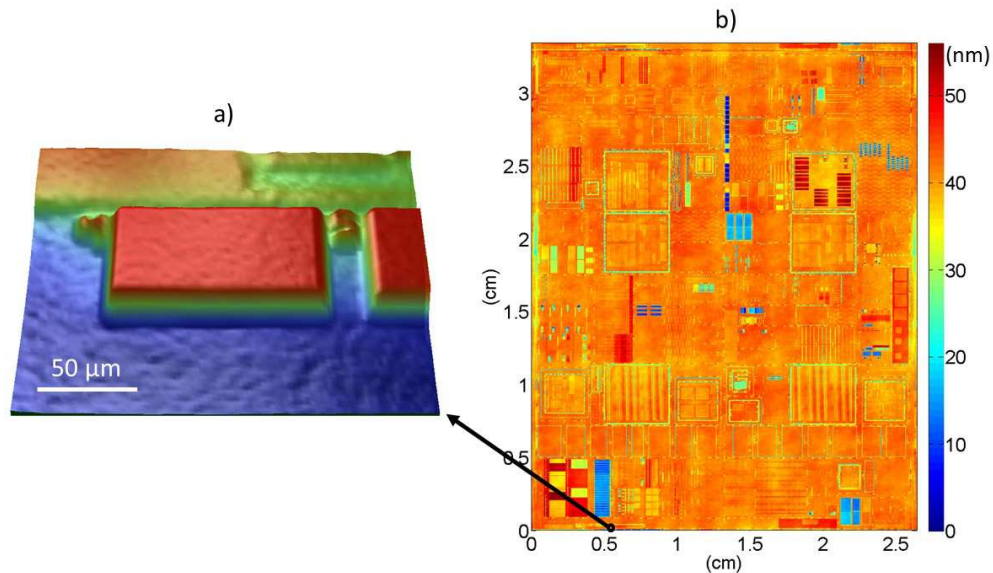


Figure 3-1 : Mesure obtenue par microscopie interférométrique a) d'une boîte de mesure ; b) d'une puce d'une surface de 8,7 cm² comportant 64 millions de points.

Comme présenté dans le chapitre 1, les boîtes de mesure sont des structures dédiées à la caractérisation et au suivi des spécifications des procédés. Il s'agit généralement de motifs de 100 micromètres par 50 micromètres de côté placés, dans les chemins de découpe, entre les différentes puces présentes sur la plaque. Ces structures sont la plupart du temps constituées d'un seul matériau et sont utilisées pour des mesures d'épaisseur et de topographie. Ce type de mesure, effectué sur plusieurs puces, donne accès à une information d'uniformité du procédé à l'échelle la plaque. Les boîtes de mesure constituent à l'heure actuelle, les principales zones de caractérisation des procédés de fabrication de la microélectronique.

Les plaques utilisées pour cette étude sont recouvertes d'une couche de tantale de 30 nm³⁷. La surface des circuits intégrés caractérisés est égale à 8,7 cm². Un objectif interférométrique de type Michelson de grossissement X5 et un sélectionneur de champ de vue de grossissement

³⁶ Comme défini dans le chapitre 2, l'amplitude de topographie correspond à la différence de hauteur entre le point le plus haut et le point le plus bas de la zone considérée.

³⁷ Les détails concernant cette couche sont fournis dans le chapitre 2 section 3.1.

X0,55 sont utilisés. Dans cette configuration la taille de la surface d'acquisition est égale à 1,8 millimètre par 2,4 millimètres et la résolution latérale est de 3,6 micromètres. L'acquisition de la puce complète est le résultat du recollement de 284 images, chacune correspondant à la moyenne de deux mesures successives. Le pourcentage de recouvrement choisi est de 10% et le recollement d'images est effectué sur l'ensemble des données présentes dans les zones de recouvrement. Les mesures ont lieu sans aspiration de la plaque et les données topographiques sont mises à plat à l'aide de la méthode présentée chapitre 2 section 3.6. Les barres d'erreur représentent l'incertitude de mesure pour un intervalle de confiance de 95,4%. Lorsqu'elles ne sont pas visibles ces dernières sont confondues avec les points de mesure.

Pour des raisons de confidentialité, les différentes valeurs présentées durant ce chapitre sont normalisées.

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'évaluation de la représentativité des valeurs topographiques usuelles issues des boites de mesure.

I. Etude de la représentativité, vis-à-vis de la nano-topographie du circuit intégré, des valeurs issues des boites de mesure

1.1 Description des procédés de CMP caractérisés

Les résultats présentés dans ce chapitre portent sur les procédés de polissage mécano-chimique de la partie *Front-End-Of-Line* du nœud technologique 28 nm. Ces derniers sont dans l'ordre de leur apparition durant la fabrication de la puce :

- le polissage des tranchées d'isolation peu profondes ou STI pour *Shallow Trench Isolation* ;
- le polissage du diélectrique pré métal ou PMD pour *Pre Metal Dielectric* ;
- le polissage des contacts en tungstène.

Les tranchées d'isolation peu profondes³⁸ sont des structures en dioxyde de silicium. Elles servent à isoler les différents transistors (Figure 3-2). L'étape de CMP STI est un polissage indirect³⁹. Il permet le retrait de l'excès du dioxyde de silicium. Une chimie sélective est utilisée de manière à s'arrêter sur le nitrure de silicium ce qui conduit à l'apparition d'un effet cuvette dans les zones de dioxyde de silicium.

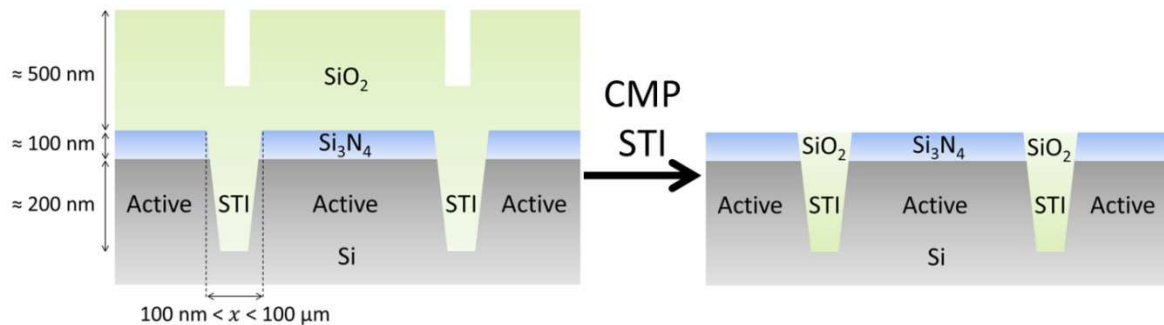


Figure 3-2 : Illustration de l'étape de polissage mécano-chimique des tranchées d'isolation peu profondes. La densité de zones actives varie de 0% à 100%.

L'étape de polissage du diélectrique pré métal est un CMP direct qui a pour but d'aplanir le diélectrique (Figure 3-3). Cette étape utilise une chimie non sélective. En effet, un seul matériau est retiré, le dioxyde de silicium.

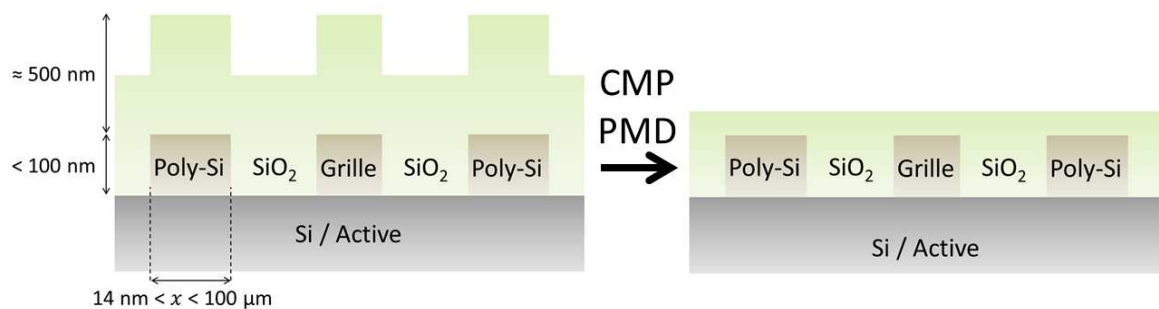


Figure 3-3 : Illustration de l'étape de polissage mécano-chimique du diélectrique pré métal. La densité de grilles varie de 0% à 100%.

³⁸ Il existe également des tranchées dites « profondes » non abordées durant ce travail de thèse, d'où l'utilisation du terme « peu profondes ».

³⁹ Les polissages indirect et direct sont présentés chapitre 1 section 2.1.

La CMP des contacts est un polissage indirect (Figure 3-4). Il permet le retrait de l'excès de tungstène. Cette étape utilise une solution abrasive sélective qui présente une vitesse d'enlèvement du dioxyde de silicium quasi nulle. Ceci provoque l'érosion du dioxyde de silicium présent dans les réseaux denses de contacts en tungstène.

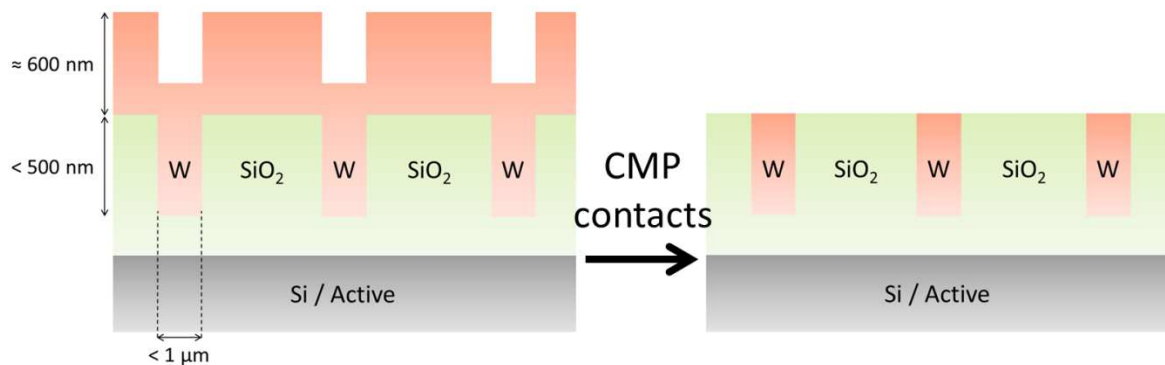


Figure 3-4 : Illustration de l'étape de polissage mécano-chimique des contacts en tungstène. La densité de contacts varie de 0% à 100%.

La Figure 3-5 montre la position dans l'intégration des procédés de CMP décrits ci-dessus.

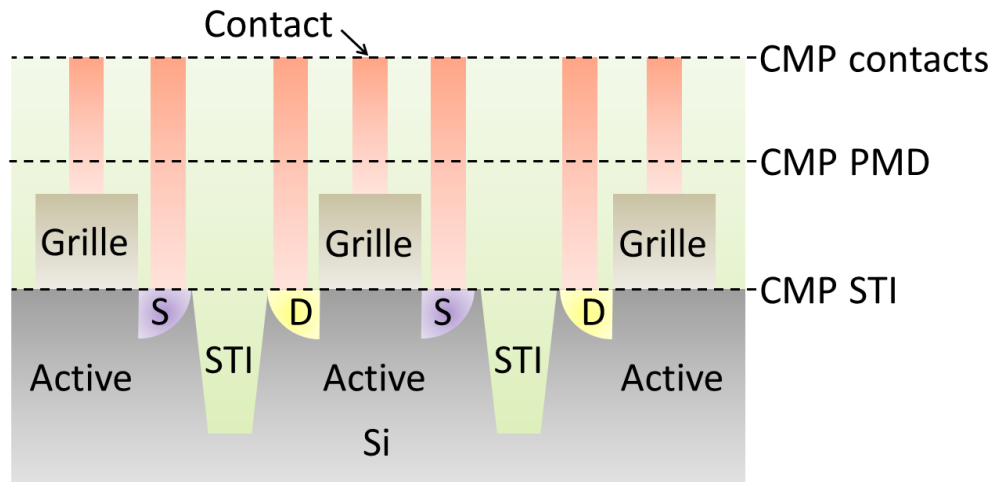


Figure 3-5 : Représentation de la position des étapes de polissage mécano-chimique mis en œuvre lors de la partie Front-End-Of-Line de la fabrication des circuits intégrés. Les zones S et D représentent la source et le drain⁴⁰.

⁴⁰ Le principe de fonctionnement ainsi que les éléments constitutifs d'un transistor MOS FET sont présentés chapitre 1 section 1.2.

Plusieurs procédés de fabrication⁴¹ ont lieu entre les différentes étapes de polissage mécano-chimique.

1.2 Le polissage des tranchées d'isolation peu profondes (CMP STI)

Ce procédé est habituellement caractérisé à l'aide de deux boîtes de mesure (Figure 3-6). La première est constituée de nitrure de silicium (zone active) et la seconde de dioxyde de silicium (STI). La grandeur mesurée est la valeur de l'effet cuvette⁴² présent dans la zone d'isolation.

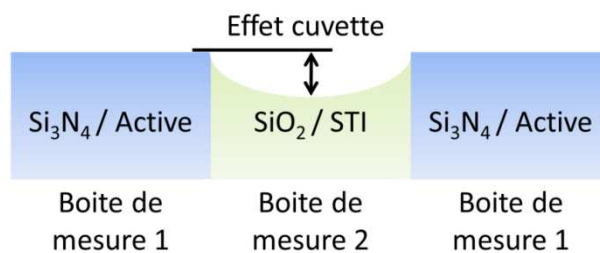


Figure 3-6 : Représentation des boîtes de mesure utilisées et de la valeur mesurée pour la caractérisation du procédé de CMP STI.

Les valeurs, de l'effet cuvette, extraites des boîtes de mesure pour les puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque sont reportées sur la Figure 3-7. Les amplitudes de topographie mesurées à travers chaque puce sont également présentées sur la figure. Les valeurs de l'amplitude topographique de la puce sont approximativement trois fois et demie plus grandes que celles mesurées dans les boîtes de mesure.

⁴¹ Les différents procédés de fabrication de l'industrie microélectronique sont détaillés dans le chapitre 1 section 1.3.

⁴² L'effet cuvette ainsi que les autres défauts topographiques abordés durant ce chapitre sont présentés chapitre 1 section 2.3.

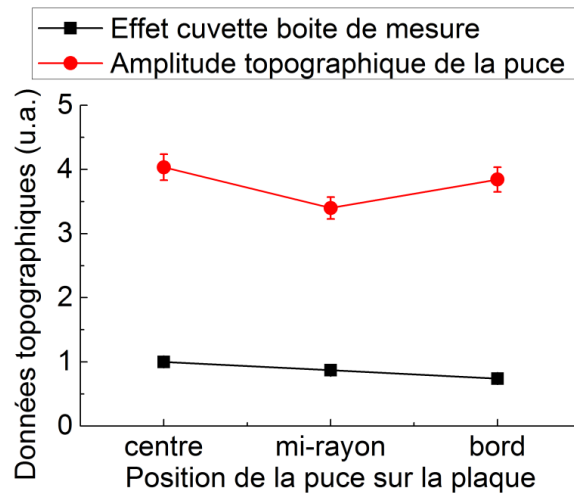


Figure 3-7 : Comparaison de l'amplitude topographique de la puce et de la valeur d'effet cuvette mesurée dans les boites de mesure pour les puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque après CMP STI.

1.3 Le polissage du diélectrique pré métal (CMP PMD)

La CMP PMD est habituellement caractérisée par une mesure de hauteur de marche. Cette dernière est effectuée entre une boite de mesure sans grille et une boite de mesure avec grille (Figure 3-8).

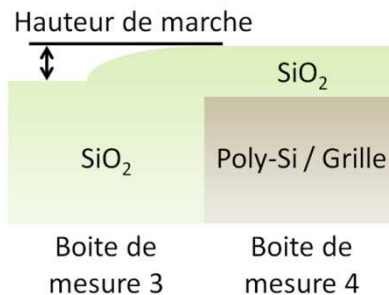


Figure 3-8 : Représentation des boites de mesure utilisées et de la valeur mesurée pour la caractérisation du procédé de CMP PMD.

Les valeurs, de hauteur de marche, relevées dans les boites de mesure ainsi que les amplitudes de topographie pour les puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque sont montrées sur la Figure 3-9. Les valeurs de l'amplitude topographique de la puce sont entre 13 et 18 fois supérieures aux valeurs mesurées dans les boites de mesure.

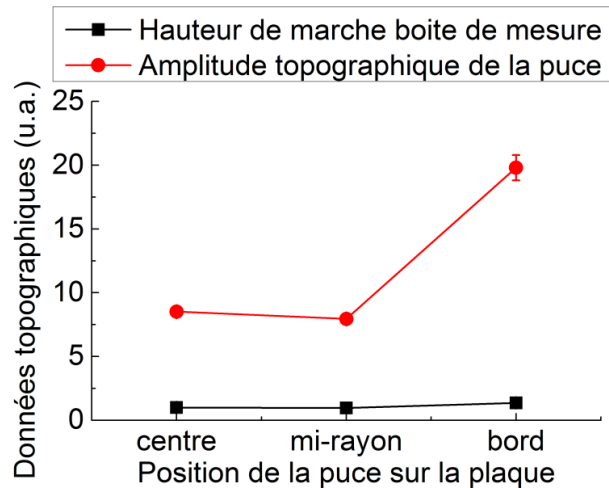


Figure 3-9 : Comparaison de l'amplitude topographique de la puce et de la valeur, de hauteur de marche, mesurée dans les boîtes de mesure pour les puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque après CMP PMD.

1.4 Le polissage des contacts en tungstène (CMP contacts)

L'efficacité de la CMP des contacts est évaluée par une mesure d'érosion du diélectrique dans une boîte de mesure présentant une densité de contacts de 14% (Figure 3-10).

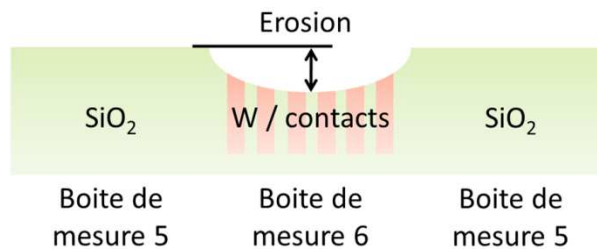


Figure 3-10 : Représentation des boîtes de mesure utilisées et de la valeur mesurée pour la caractérisation du procédé de CMP contacts.

Les valeurs, d'érosion, extraites des boîtes de mesure pour les puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque sont reportées sur la Figure 3-11. Les amplitudes de topographie mesurées à travers chaque puce sont également présentées sur la Figure 3-11. Les valeurs de l'amplitude topographique de la puce sont entre 13 et 18 fois supérieures aux valeurs mesurées dans les boîtes de mesure.

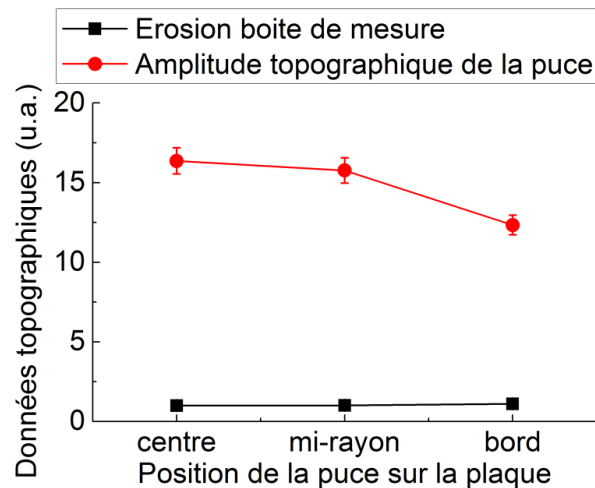


Figure 3-11 : Comparaison de l'amplitude topographique de la puce et de la valeur d'érosion mesurée dans les boites de mesure pour les puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque après CMP contacts.

En conclusion, les résultats présentés durant cette section montrent que les boites de mesure ne sont pas représentatives de la topographie du circuit intégré. Les valeurs de l'amplitude topographique de la puce sont entre trois fois et dix-huit fois plus grandes que celles des boites de mesure. La suite de ce chapitre est consacrée à l'extraction, à partir des données de mesure, de valeurs pertinentes pour la caractérisation de la nano-topographie, induite par le procédé de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques.

II. Etude des zones marginales

2.1 Quantification du pourcentage et de l'amplitude des zones marginales et détection de leur localisation

La section précédente a montré que les valeurs topographiques extraites des boites de mesure présentent de fortes différences avec les valeurs de l'amplitude topographique des circuits intégrés sur lesquels se trouvent ces mêmes boites de mesure. Afin de comprendre ce phénomène l'étude se concentre sur la puce positionnée au centre de la plaque après CMP STI. La distribution des hauteurs mesurées à travers cette puce est reportée Figure 3-12.

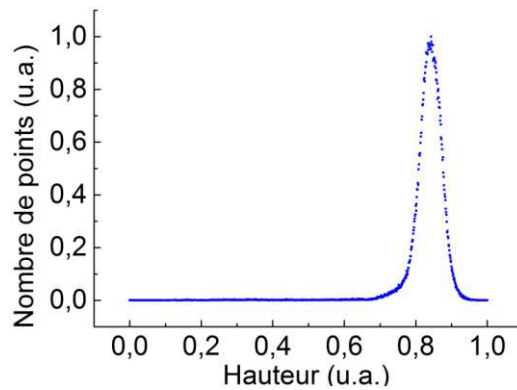


Figure 3-12 : Courbe de distribution des hauteurs de la puce située au centre de la plaque après CMP STI. La courbe de distribution des hauteurs est obtenue en répartissant les 64 000 000 de points dans 1000 classes de hauteurs. La hauteur minimale est associée à la classe de hauteurs incluant la hauteur nulle (égale à 0). La normalisation des valeurs est effectuée en divisant chaque hauteur par la hauteur maximale.

La courbe de distribution des hauteurs montre que l'amplitude topographique de la puce n'est pas la valeur la plus représentative de la surface analysée. Ceci est dû aux classes de hauteurs quasi vides associées aux zones que nous appellerons « zones marginales » par la suite. Ces zones présentent une différence de hauteur importante vis-à-vis du reste de la topographie.

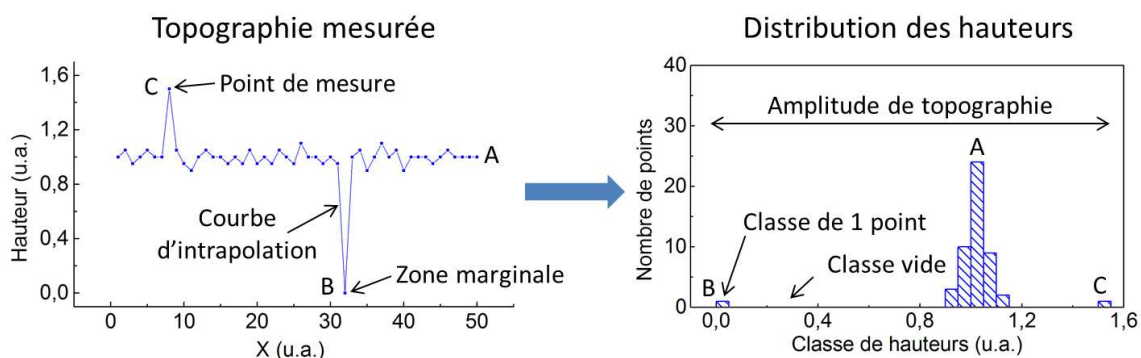


Figure 3-13 : Représentation de la topographie d'une surface présentant deux zones marginales et de la distribution des hauteurs de cette surface.

La valeur de l'amplitude topographique de la puce fournit une information intéressante, néanmoins, il est également important de connaître l'amplitude topographique de la puce après exclusion de ces zones marginales.

Aujourd'hui, la méthode systématiquement utilisée, consiste en l'exclusion de classes de hauteurs extrêmes. La Figure 3-14 montre que les classes vides associées aux zones marginales rendent cette méthode inappropriée pour notre étude.

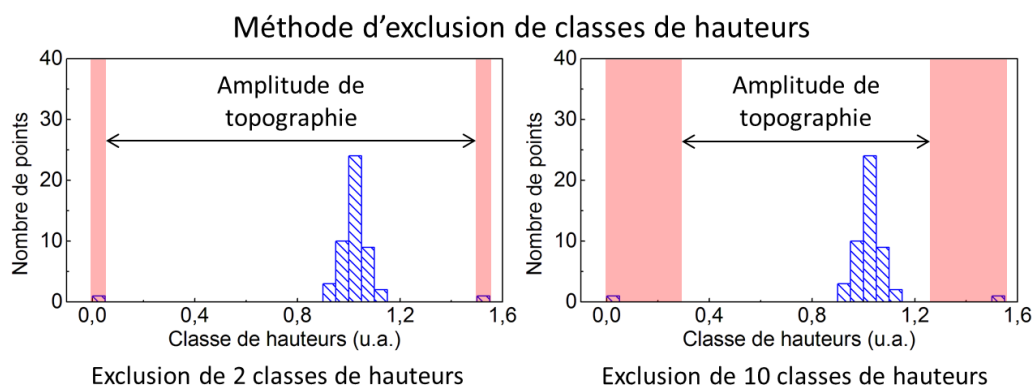


Figure 3-14 : Illustration de la méthode routinière d'exclusion de classes de hauteurs.

Afin de disposer d'une valeur « représentative » de la majorité de la surface nous utilisons une méthode que nous nommons « exclusion de points ». Il existe plusieurs méthodes d'exclusion de points. Habituellement, les points sont exclus de manière unilatérale. Ainsi, les points exclus sont associés, soit aux hauteurs maximales, soit aux hauteurs minimales⁴³. Cette méthode d'exclusion de points ne convient pas à notre étude car il est tout à fait possible que les zones marginales soient composées de zones hautes et de zones basses (Figure 3-15).

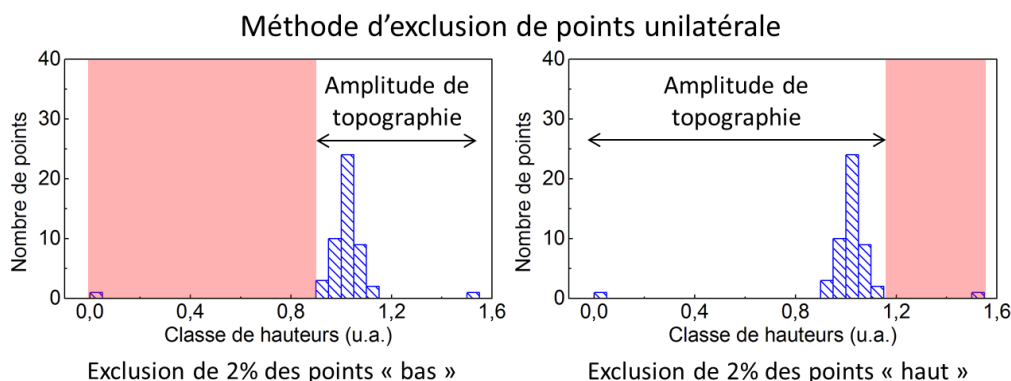


Figure 3-15 : Illustration de la méthode d'exclusion de points unilatérale.

⁴³ La courbe représentant l'amplitude de topographie en fonction du pourcentage de points exclus de façon unilatérale est connue sous le nom de courbe d'Abbott-Firestone.

Pour pallier à cette difficulté, nous avons développé, durant ce travail de thèse, une méthode innovante d'exclusion de points bilatérale et non symétrique. L'exclusion de points se fait de la manière itérative suivante : les amplitudes de hauteur A_{gauche} et A_{droite} sont calculées en supprimant respectivement les hauteurs hautes représentées par $x\%$ ⁴⁴ de points et les hauteurs basses représentées par $x\%$. Si $A_{\text{gauche}} < A_{\text{droite}}$ on supprime les hauteurs hautes représentées par $x\%$ de points, si $A_{\text{droite}} < A_{\text{gauche}}$ on supprime les hauteurs basses représentées par $x\%$ de points (Figure 3-16). A chaque itération, les valeurs de l'amplitude $A(i) = \min(A_{\text{gauche}}, A_{\text{droite}})$ et du pourcentage de points restants $\text{per_cent}(i) = 100\% - ix\%$ sont stockées en mémoire. Le processus continue jusqu'à l'exclusion de tous les points.

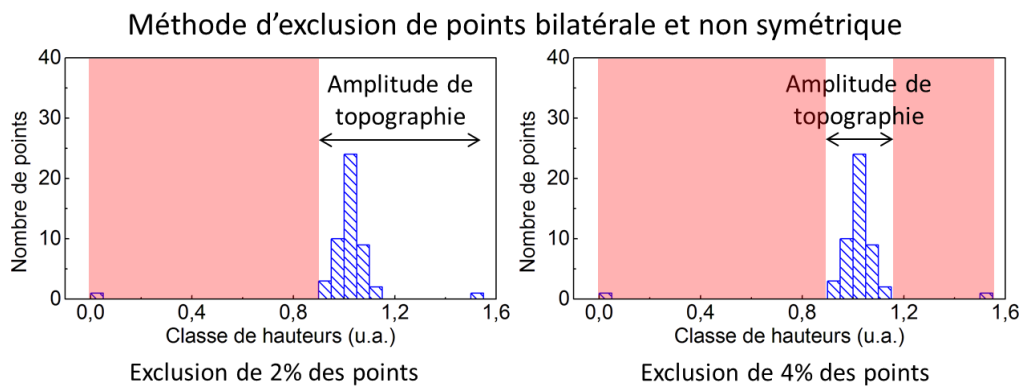


Figure 3-16 : Illustration de la méthode d'exclusion de points bilatérale et non symétrique.

La courbe des amplitudes de hauteur $A(i)$ en fonction du pourcentage de points exclus $\text{per_cent}(i)$ est tracée Figure 3-17. Dans la suite de l'étude nous appelons cette courbe : « courbe d'exclusion de points ». Nous considérons, de manière arbitraire, que le pourcentage et l'amplitude de topographie des zones marginales sont donnés par le premier point pour lequel la dérivée seconde de la courbe est nulle. La hauteur correspondante à ce point donne l'amplitude de topographie des zones marginales.

⁴⁴ La valeur de x est définie par l'utilisateur. Durant cette étude x est égal à 0,1. En conséquence « la courbe d'exclusion de points » est composée de 1000 points.

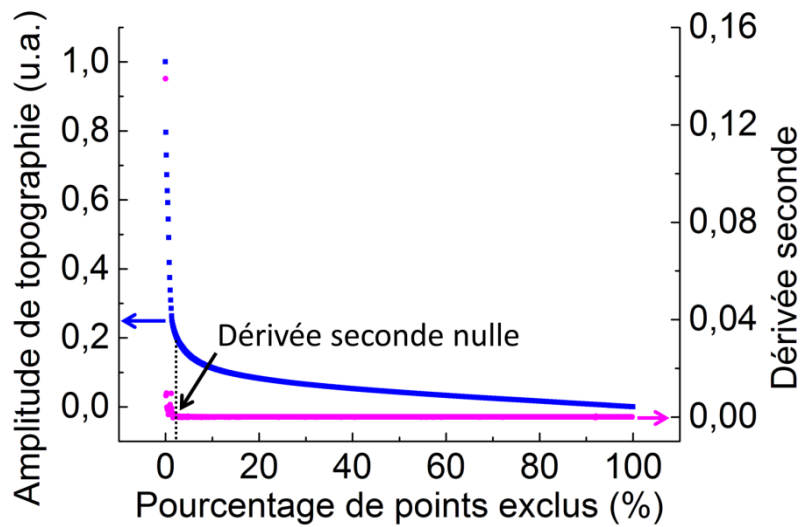


Figure 3-17 : Courbe d'exclusion de points de la puce située au centre de la plaque après CMP STI et position du premier point de la courbe pour lequel la dérivée seconde est nulle. Ce point indique de façon arbitraire le pourcentage de zones marginales et l'amplitude de topographie des zones marginales. Toutes les courbes d'exclusion de points sont générées à partir d'exclusions consécutives de points portant sur 0,1% des points.

Les courbes d'exclusion de points pour les puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque sont reportées sur la Figure 3-18 pour les trois procédés de CMP caractérisés.

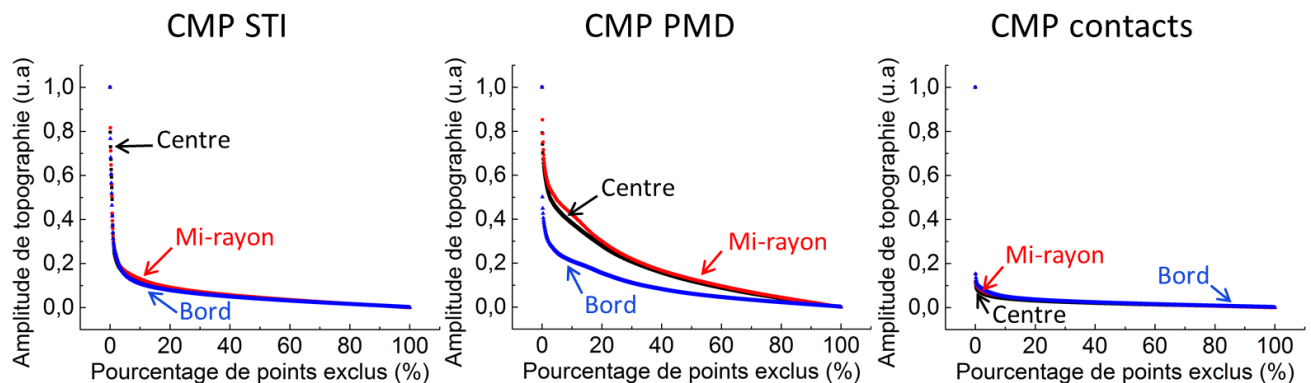


Figure 3-18 : Courbe d'exclusion de points des puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque en fonction du procédé de polissage. Chaque courbe est normalisée de manière indépendante.

Les valeurs, pour les trois procédés de CMP de la partie *Front-End-Of-Line*, du pourcentage et de l'amplitude de topographie des zones marginales pour les puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque sont reportées sur le Tableau 3-1 et le Tableau 3-2.

Pourcentage de zones marginales			
	STI	PMD	Contacts
Centre	2,0%	2,0%	0,5%
Mi-rayon	2,7%	4,0%	0,7%
Bord	2,0%	2,0%	0,7%

Tableau 3-1 : Tableau du pourcentage de zones marginales des puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque en fonction du procédé de polissage.

Le pourcentage de zones marginales est inférieur à 5% quel que soit le procédé de polissage. La position de la puce sur la plaque a peu d'influence sur le pourcentage de zones marginales. En conséquence, ces zones semblent être liées à la répartition et aux caractéristiques géométriques (taille et densité) des structures du niveau correspondant.

Amplitude de topographie des zones marginales

	STI	PMD	Contacts
Centre	0,78 u.a.	0,47 u.a.	0,91 u.a.
Mi-rayon	0,80 u.a.	0,49 u.a.	0,90 u.a.
Bord	0,76 u.a.	0,69 u.a.	0,89 u.a.

Tableau 3-2 : Tableau de l'amplitude de topographie des zones marginales des puces situées au centre, à mi-rayon en fonction du procédé de polissage.

Malgré leur faible pourcentage, les zones marginales augmentent de manière importante l'amplitude de la topographie, notamment pour la CMP des contacts et la CMP STI. L'amplitude de topographie des zones marginales est constante quelle que soit la position de la puce sur la plaque. Ceci confirme l'hypothèse précédente reliant ces zones à la répartition et aux caractéristiques géométriques (taille et densité) des structures du niveau correspondant. Une forte augmentation de l'amplitude de topographie des zones marginales est observée sur la puce en bord de plaque pour la CMP PMD. Elle est attribuée à un problème d'uniformité de

polissage à l'échelle de la plaque. Cette non-uniformité est visible sur la cartographie obtenue par microscopie interférométrique (Figure 3-19). Il apparaît que la technique permet la détection de ce type d'anomalie topographique.

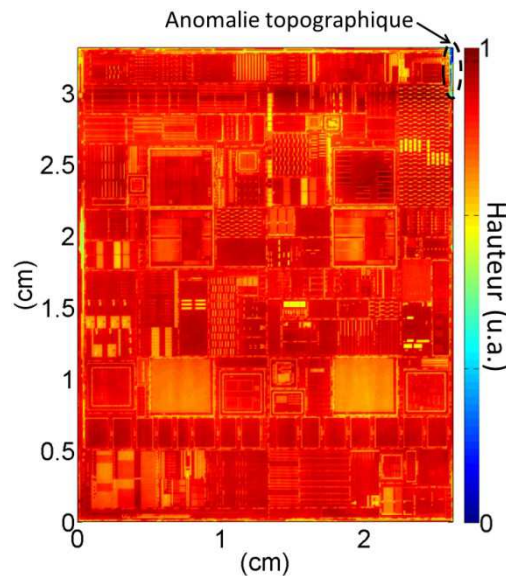


Figure 3-19 : Mesure obtenue par microscopie interférométrique de la puce en bord de plaque après CMP PMD et localisation d'une anomalie topographique due à une mauvaise uniformité de polissage à l'échelle de la plaque.

La localisation des zones marginales est importante car elle permet de valider l'efficacité du procédé à l'échelle de la puce. En effet, il est possible d'obtenir une topographie parfaitement plane dans une boîte de mesure qui n'est pas représentative de la topographie de la puce. La connaissance de la position des zones marginales fournit des sites de mesure caractéristiques des défauts de polissage et rend possible l'investigation et la compréhension de leur origine. La quantification du pourcentage et de l'amplitude de topographie des zones marginales permet leur localisation. En effet, à partir de l'algorithme de calcul de la courbe d'exclusion de points et de la connaissance du pourcentage de zones marginales il est possible d'extraire l'amplitude de topographie des zones marginales, hautes et basses. Un filtre en hauteur sur la cartographie permet ensuite de localiser les zones concernées. Les Figure 3-20, Figure 3-21 et Figure 3-22 illustrent la cartographie obtenue par microscopie interférométrique pour chacun des procédés caractérisés et la localisation des zones marginales.

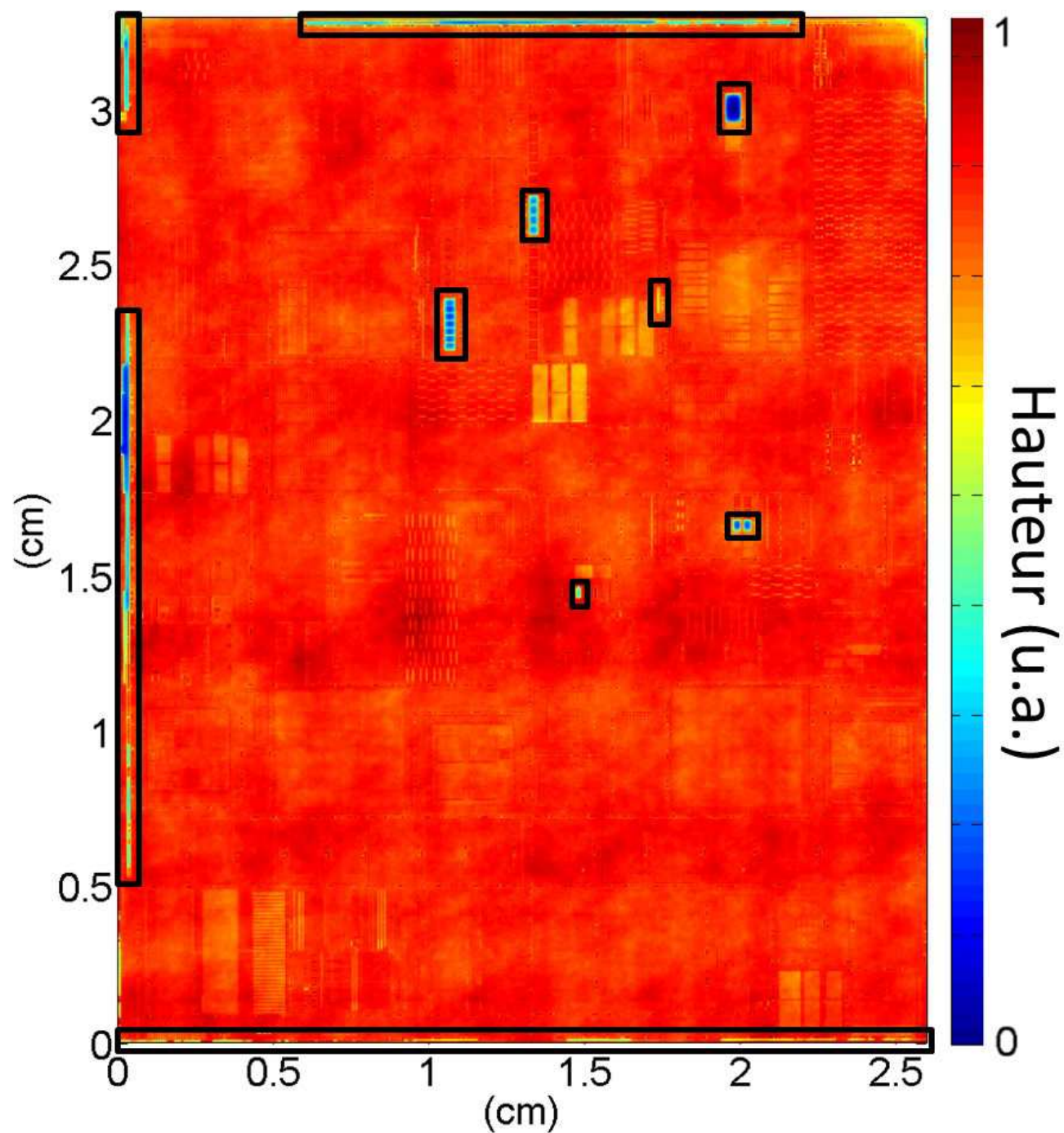


Figure 3-20 : Mesure obtenue par microscopie interférométrique de la puce située au centre de la plaque après CMP STI et localisation des zones marginales.

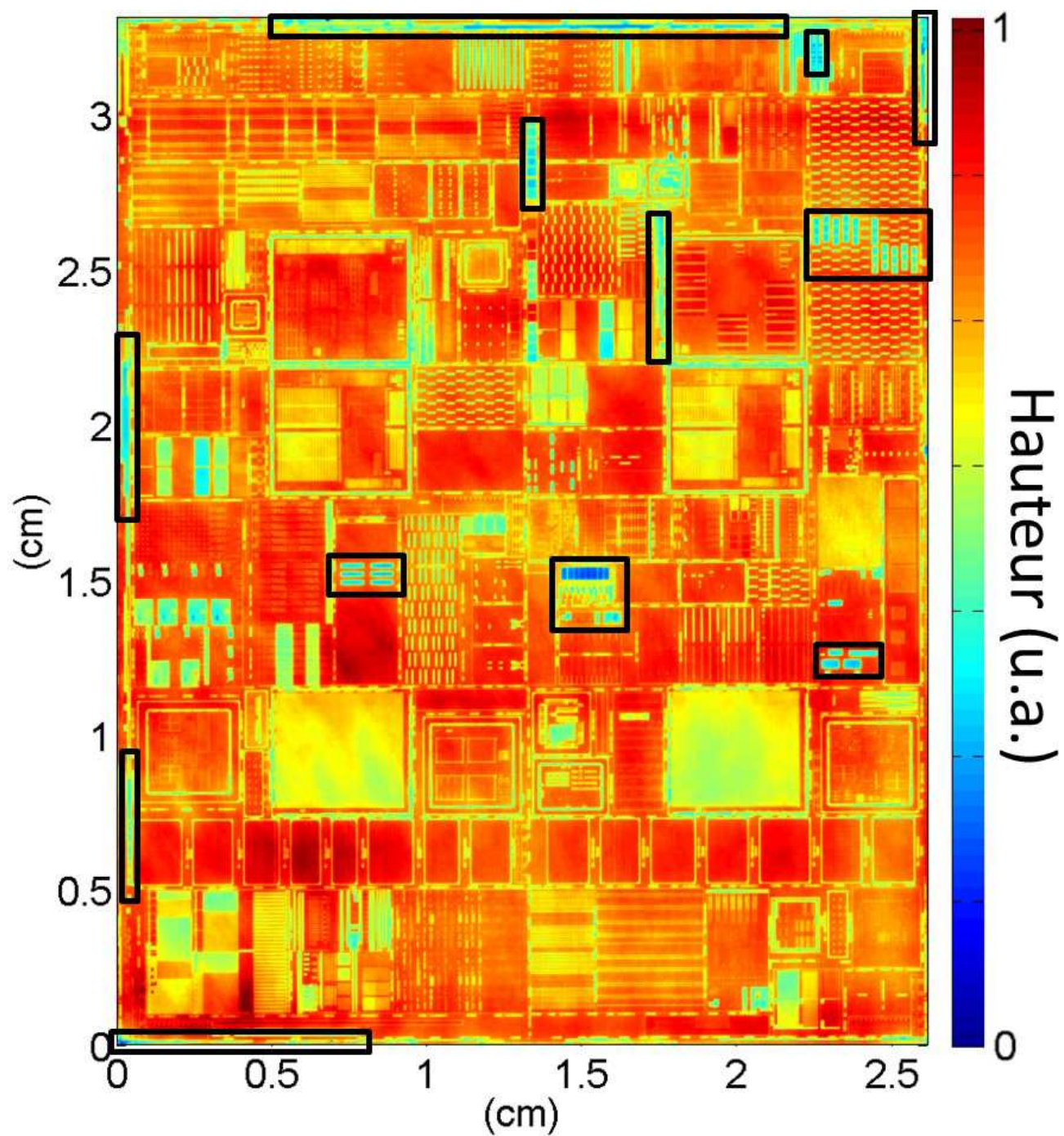


Figure 3-21 : Mesure obtenue par microscopie interférométrique de la puce située au centre de la plaque après CMP PMD et localisation des zones marginales.

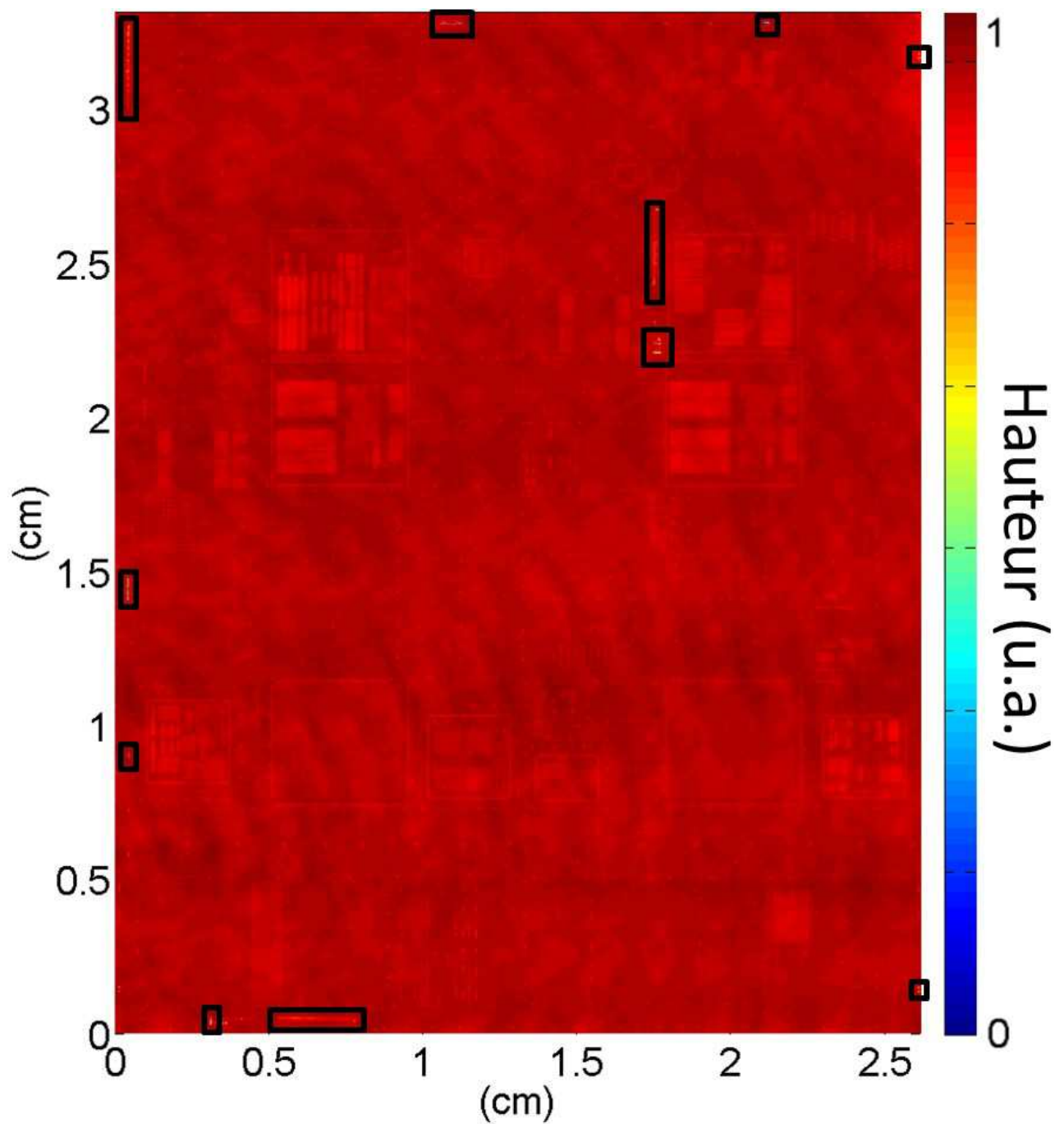


Figure 3-22 : Mesure obtenue par microscopie interférométrique de la puce située au centre de la plaque après CMP contacts et localisation des zones marginales.

Il apparaît que la majorité des zones marginales (plus de 60%) est localisée dans les chemins de découpe. Cette observation est étendue à toutes les étapes de polissage mécano-chimique caractérisées durant ce travail de thèse. Pour un procédé donné, la position des zones marginales est identique quelle que soit la position de la puce sur la plaque.

Afin de pouvoir optimiser les procédés de CMP il est important de comprendre l'origine de ces zones mais également d'analyser leur impact sur la topographie de la puce.

2.2 Impact et origine des zones marginales

La quantité importante de points constituant la mesure autorise un grossissement des zones marginales. La Figure 3-23 montre un exemple dans le cas de la CMP STI.

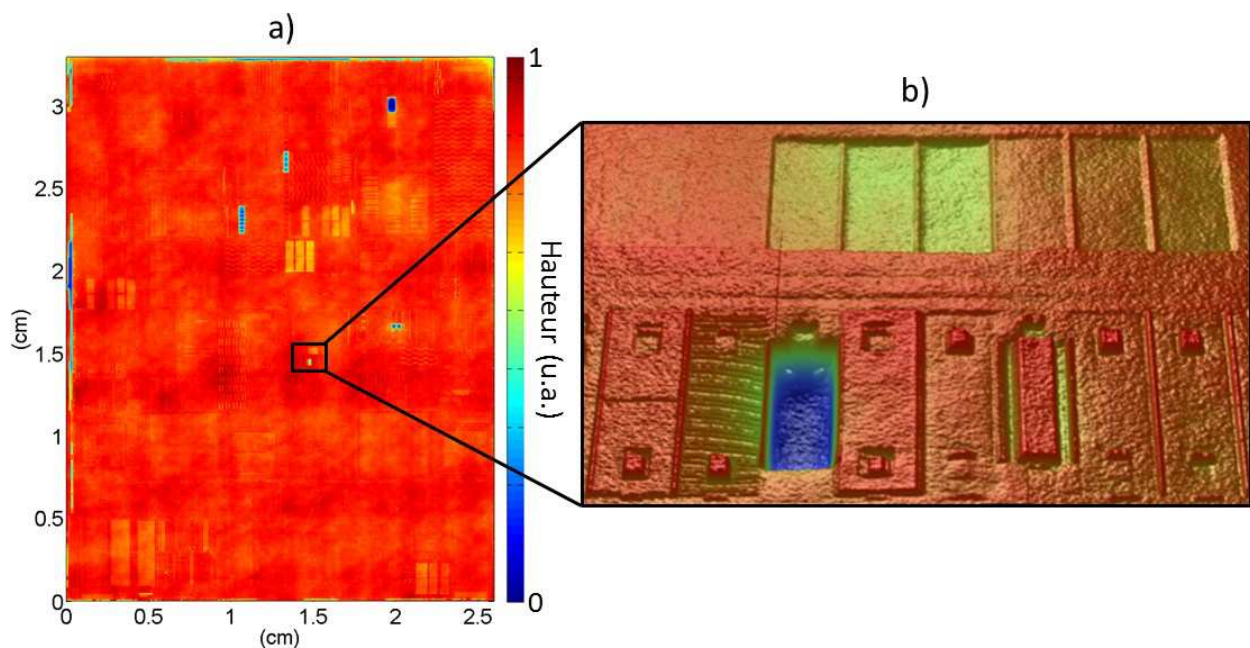


Figure 3-23 : Mesure obtenue par microscopie interférométrique a) de la puce située au centre de la plaque après CMP STI ; b) grossissement d'une zone marginale.

La zone marginale, en bleue, correspondant à un fort effet cuvette, apparaît clairement. De plus, il est observé que cette dernière a un impact sur la topographie de son voisinage.

L'extraction d'un profil topographique de cette zone (Figure 3-24-a) permet de quantifier l'amplitude et l'étendue de cet impact.

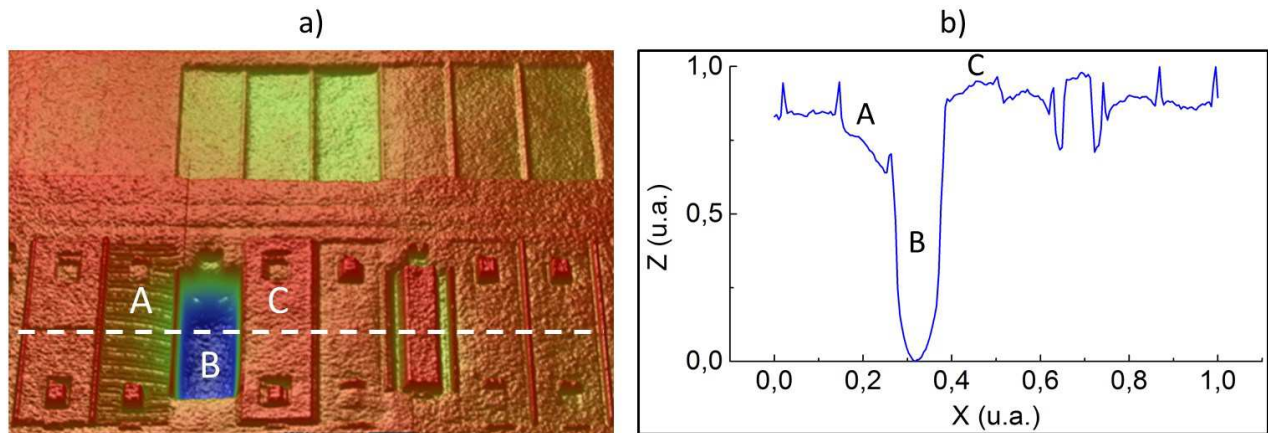


Figure 3-24 : a) Grossissement d'une zone marginale à partir d'une mesure obtenue par microscopie interférométrique de la puce située au centre de la plaque après CMP STI ; b) profil associé aux pointillés.

La Figure 3-24-b montre que la zone marginale B a un impact différent sur les zones voisines A et C. Ainsi, même en présence d'un faible pourcentage de zones marginales leur impact sur la topographie de la puce peut être important. L'optimisation des procédés de polissage peut permettre de diminuer l'étendue, l'amplitude et l'impact de ces zones marginales.

Afin de mieux comprendre les résultats des mesures de la nano-topographie, induite par l'étape de CMP, sur des distances centimétriques, la cartographie de la topographie d'une zone marginale (Figure 3-24-a) est comparée à la cartographie de la densité de structures⁴⁵ ; dans ce cas des zones actives (Figure 3-25). L'impact de la densité et de la taille des motifs sur l'efficacité du polissage mécano-chimique est clairement observable et quantifiable. Ce type d'analyse présente un grand intérêt car il permet la mise en œuvre d'une action préventive. Cette dernière consiste à déterminer les règles de dessin optimales, densité de motifs minimale et

⁴⁵ Une cartographie de la densité de motifs permet d'illustrer, à l'aide d'un code couleur, la densité de motifs présents dans une zone représentée par un pixel. La taille de la zone peut être choisie. Ce type de donnée est généré à partir du fichier informatique du dessin du circuit intégré.

maximale, taille de motif minimale et maximale, ne générant pas de zones marginales ou limitant leur impact.

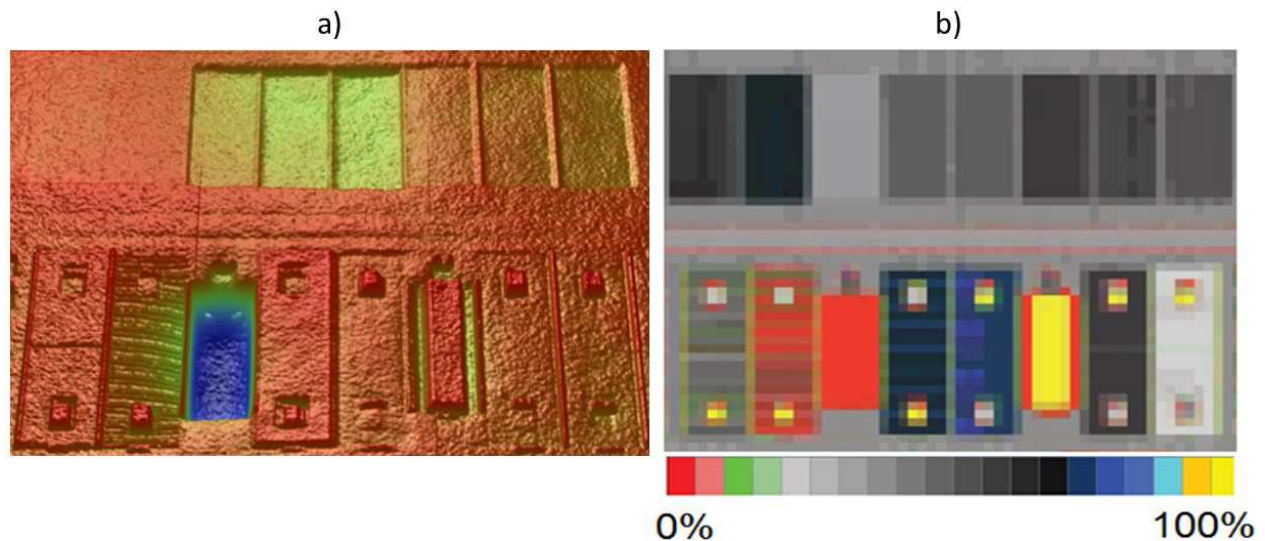


Figure 3-25 : a) Grossissement d'une zone marginale à partir d'une mesure obtenue par microscopie interférométrique de la puce située au centre de la plaque après CMP STI ; b) cartographie de la densité de zones actives, de cette zone marginale. L'échantillonnage spatial de la cartographie de densité ($4\text{ }\mu\text{m}$) est équivalent à celui de la cartographie obtenue par microscopie interférométrique ($3,6\text{ }\mu\text{m}$).

Les Figure 3-26, Figure 3-27 et Figure 3-28 présentent respectivement les mesures obtenues par microscopie interférométrique d'une puce après CMP STI, CMP PMD et CMP contacts et, respectivement, les cartographies de densité de zones actives, de grilles et de contacts à travers la puce. Les cartographies de densité présentent un échantillonnage spatial ($4\text{ }\mu\text{m}$) équivalent à celui de la cartographie obtenue par microscopie interférométrique ($3,6\text{ }\mu\text{m}$).

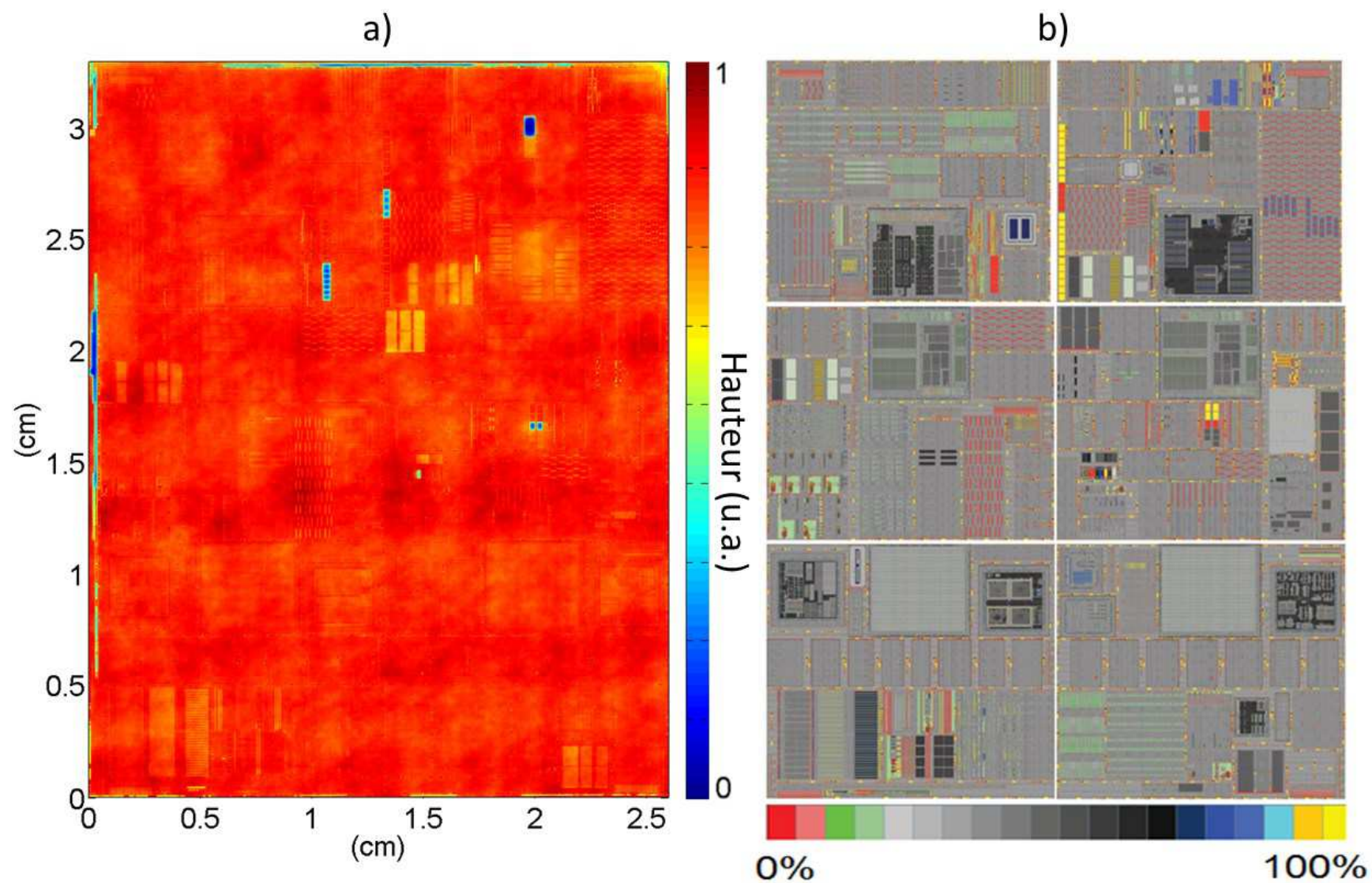


Figure 3-26 : a) Mesure obtenue par microscopie interférométrique de la puce située au centre de la plaque après CMP STI ; b) cartographie de densité de zones actives de la puce. L'échantillonnage spatial ($4\text{ }\mu\text{m}$) est équivalent à celui de la cartographie obtenue par microscopie interférométrique ($3,6\text{ }\mu\text{m}$).

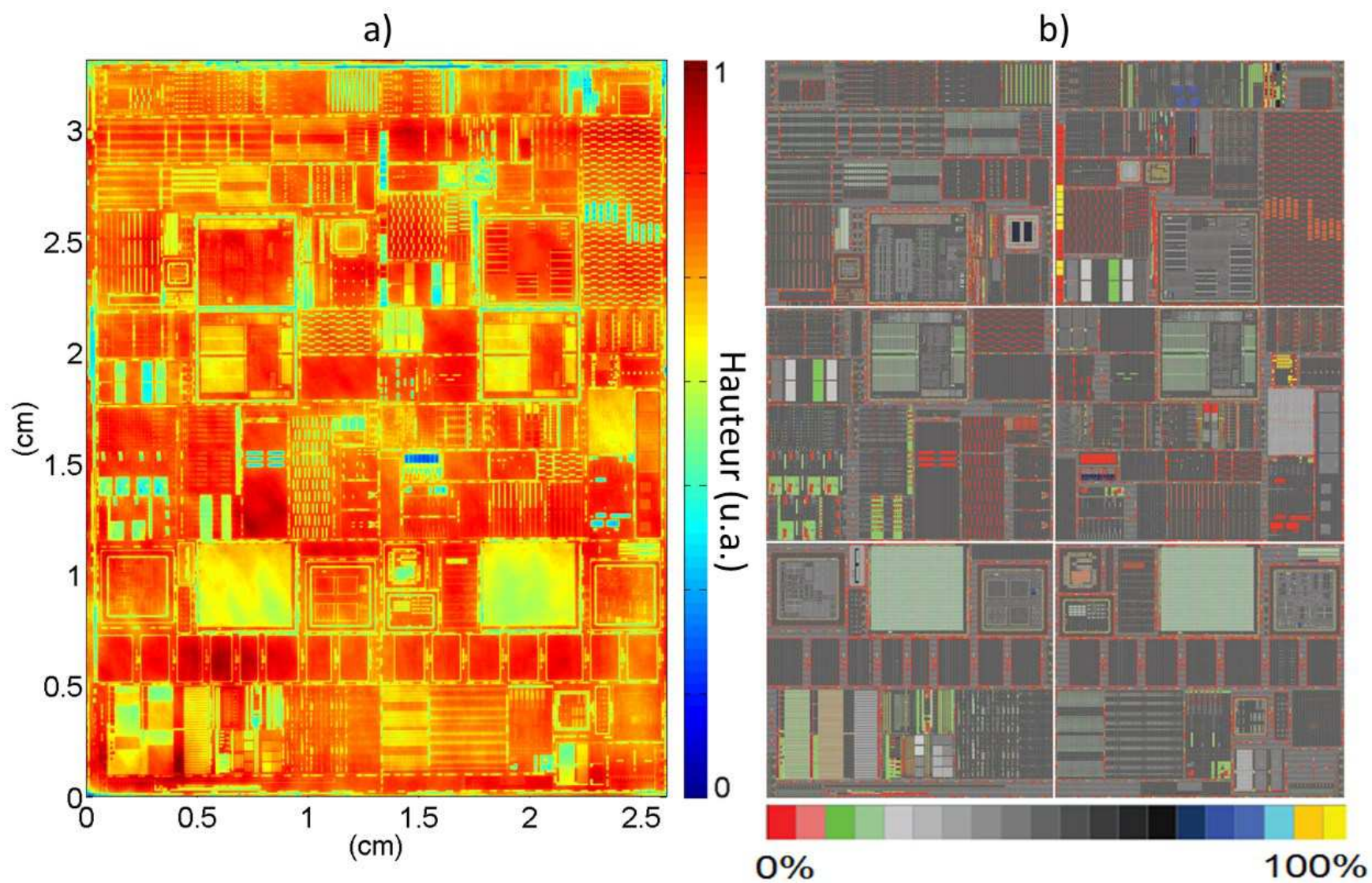


Figure 3-27 : a) Mesure obtenue par microscopie interférométrique de la puce située au centre de la plaque après CMP PMD ; b) cartographie de densité de grilles de la puce. L'échantillonnage spatial ($4\text{ }\mu\text{m}$) est équivalent à celui de la cartographie obtenue par microscopie interférométrique ($3,6\text{ }\mu\text{m}$).

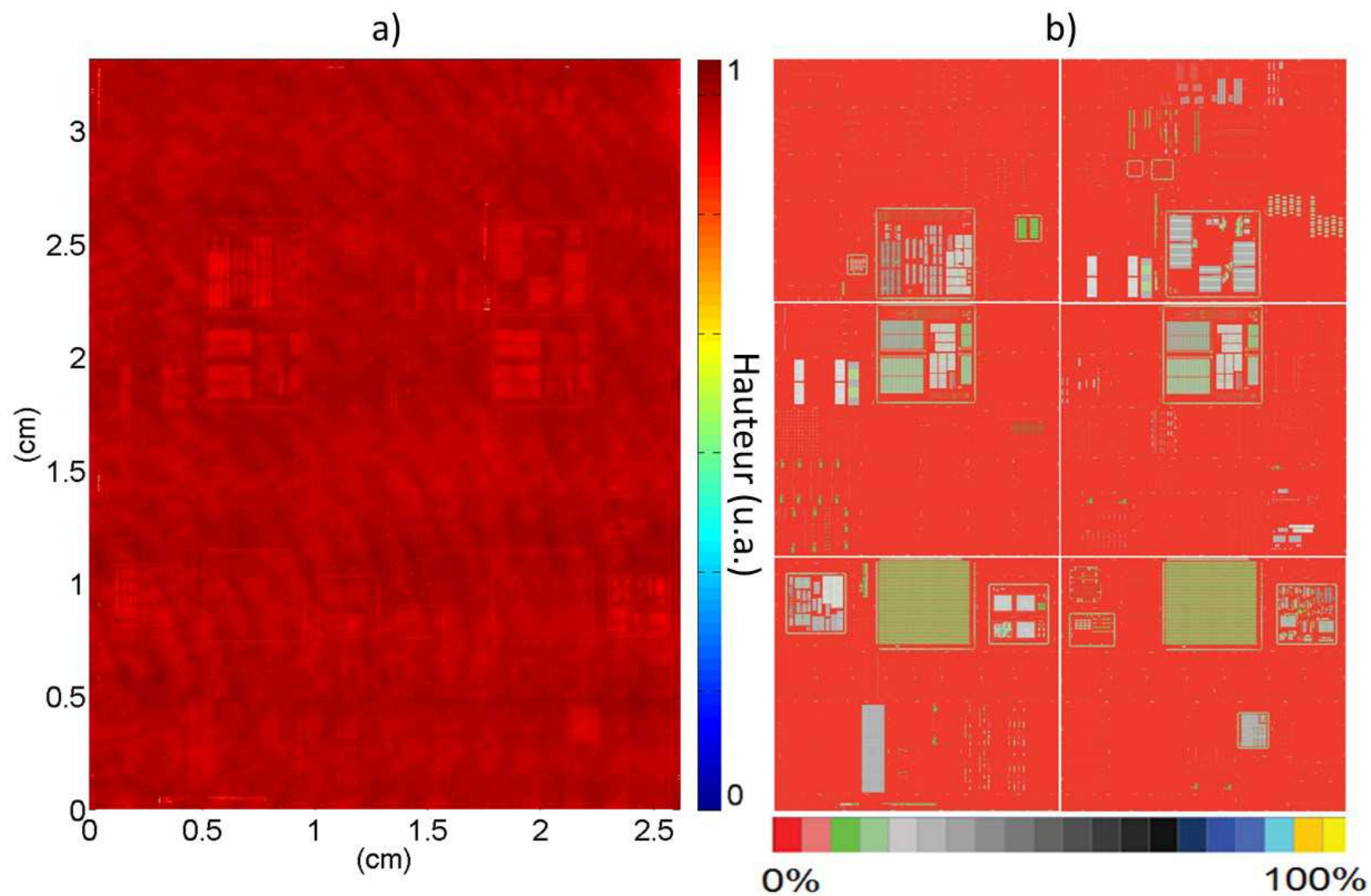


Figure 3-28 : a) Mesure obtenue par microscopie interférométrique de la puce située au centre de la plaque après CMP contacts ; b) cartographie de densité de contacts de la puce. L'échantillonnage spatial ($4\text{ }\mu\text{m}$) est équivalent à celui de la cartographie obtenue par microscopie interférométrique ($3,6\text{ }\mu\text{m}$).

Le Tableau 3-3 regroupe les densités et tailles de motifs induisant la présence de zones marginales pour les trois procédés de polissage mécano-chimique de la partie *Front-End-Of-Line* du nœud technologique 28 nm.

Conditions d'apparition des zones marginales

	STI (structure = zone active)
Densité de structures (%)	entre 0 et 5
Taille de structure (µm)	> 125
	PMD (structure = grille)
Densité de structures (%)	entre 0 et 5
Taille de structure (µm)	> 225
	Contacts (structure = contact)
Densité de structures (%)	> 50
Taille de structure (µm)	> 60

Tableau 3-3 : Tableau des conditions d'apparition (densité et taille des structures) des zones marginales pour les trois procédés de CMP caractérisés.

Il est important que la cartographie de densité de motifs soit générée avec le même échantillonnage spatial que celui de la technique de caractérisation. La Figure 3-29 illustre l'erreur d'interprétation qui peut résulter d'un mauvais échantillonnage spatial de la cartographie de densité de motifs.

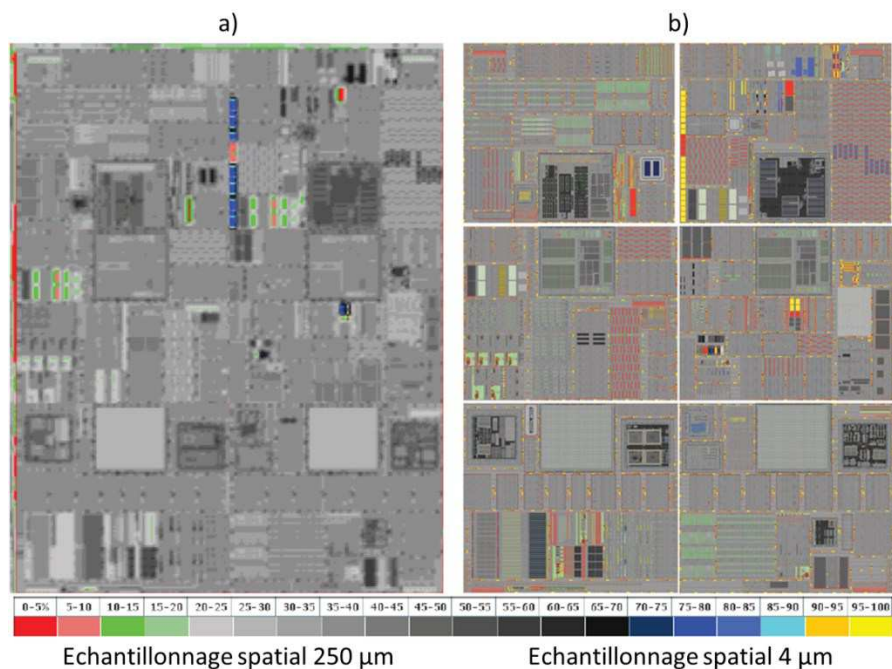


Figure 3-29 : Cartographie de densité de motifs avec a) échantillonnage spatial égal à 250 µm ; b) échantillonnage spatial égal à 4 µm.

Ces différentes observations permettent de conclure qu'une résolution latérale de 3,6 μm est suffisante pour l'étude de ce type de problématique.

III. Compléments de caractérisation de la nano-topographie du circuit intégré induite par les procédés de CMP

3.1 Discussion sur la courbe de distribution des hauteurs

Nous allons maintenant analyser plus en détails les courbes de distribution des hauteurs. Avant polissage, la courbe de distribution des hauteurs, présente deux pics principaux représentant les parties hautes et basses des structures (voir section 1.1). L'aplanissement a pour but de faire fusionner ces pics. Un polissage parfait donnerait une surface parfaitement plane dont la distribution des hauteurs serait une distribution de dirac.

La Figure 3-30 montre la distribution des hauteurs associée respectivement à la puce située au centre, à mi-rayon et en bord de plaque pour chacun des trois procédés de CMP caractérisés. Toutes les distributions des hauteurs sont obtenues en répartissant les 64 000 000 de points dans 1000 classes de hauteurs. Pour chaque distribution, on associe la hauteur minimale à la classe de hauteurs incluant la hauteur nulle. On procède ensuite à la normalisation. Ainsi, pour chaque polissage, on divise les différentes valeurs des trois distributions par la valeur maximale de ces trois distributions. Ceci permet, pour chaque polissage, de garder une information de hauteur relative entre les différentes distributions.

Les courbes de distribution des hauteurs peuvent être classées dans deux familles : celle associée aux polissages utilisant des chimies sélectives (CMP STI et contacts) et celle associée aux polissages utilisant des chimies non sélectives (CMP PMD). Les courbes de distribution des hauteurs de la première famille peuvent être décrites par une distribution gaussienne. Des ajustements, par une fonction gaussienne, basés sur la méthode des moindres carrés

présentent des coefficients de détermination⁴⁶, R^2 , supérieurs à 0,98. Ceci indique que le procédé est suffisamment efficace pour que la dépendance de la topographie vis-à-vis de la taille et de la densité des motifs ne soit plus observable sur la courbe.

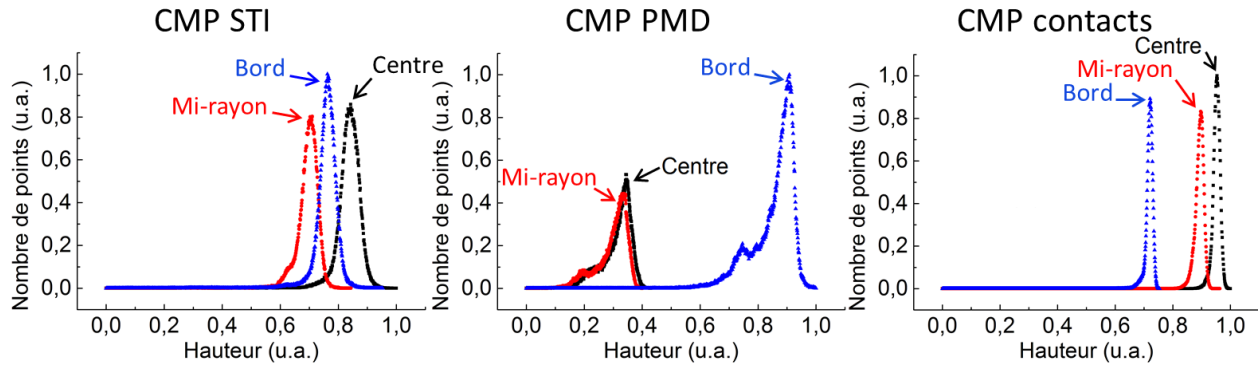


Figure 3-30 : Courbes de distribution des hauteurs des puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque pour chacun des trois types de polissage mécano chimique caractérisés, CMP STI, CMP PMD et CMP contacts.

La Figure 3-30 montre que, pour le polissage PMD, la courbe de distribution des hauteurs présente deux « pics » qui correspondent aux zones hautes et basses présentes avant le polissage. Cette double répartition des hauteurs est attribuée au caractère non sélectif de ce type de polissage. Ce résultat illustre la limitation des méthodes de caractérisation actuelles qui ne permettent qu’une mesure de la topographie sur de faibles distances. Pour la première fois nous avons mis en évidence qu’un polissage sélectif permet d’obtenir une bonne uniformité de polissage à l’échelle de la puce mais introduit la présence d’effet cuvette et d’érosion. Nous avons également montré qu’une étape de polissage non sélective, obligatoire en présence d’un seul matériau, n’induit pas ces défauts topologiques mais souffre d’une mauvaise uniformité de polissage à l’échelle de la puce.

L’écart type⁴⁷, c’est-à-dire la non uniformité de polissage à l’échelle du circuit intégré, est calculé pour les polissages sélectifs qui présentent une distribution des hauteurs gaussienne.

⁴⁶ Soit la somme des carrés des résidus : $SS_{\text{res}} = \sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2$, où n est le nombre de points de mesure, y_i est l’ordonnée du $i^{\text{ème}}$ point et f_i l’ordonnée ajustée du $i^{\text{ème}}$ point. Soit la somme des carrés des écarts à la moyenne : $SS_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$, où \bar{y} est la moyenne des valeurs mesurées : $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$. Le coefficient de détermination utilisé et noté R^2 est donné par la formule : $R^2 = 1 - (SS_{\text{res}}/SS_{\text{tot}})$.

⁴⁷ La notion d’écart type est présentée dans le chapitre 1 section 3.1.

Pour cela on utilise un ajustement, par une fonction gaussienne, basé sur la méthode des moindres carrés. On observe Figure 3-31 que la puce située en bord de plaque présente la plus faible non uniformité de polissage pour la CMP STI et la CMP contacts.

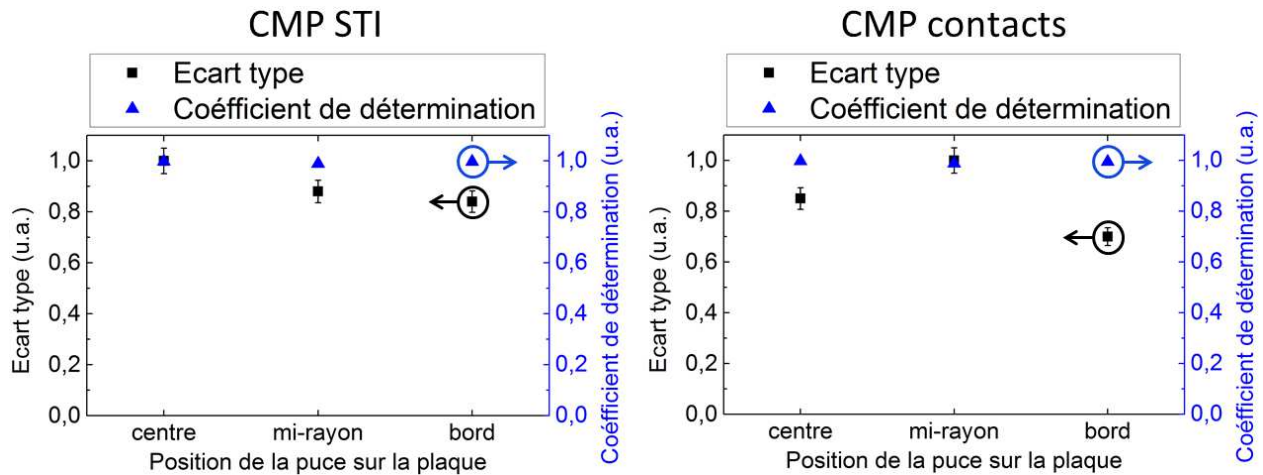


Figure 3-31 : Ecart type de la distribution des hauteurs après CMP STI et CMP contacts pour trois puces situées au centre, à mi-rayon et en bord de plaque. Ces écarts types sont calculés par un ajustement, par une fonction gaussienne, basé sur la méthode des moindres carrés. Les coefficients de détermination sont reportés sur la figure.

Les courbes de distribution des hauteurs permettent également d'obtenir des informations sur la topographie des puces en fonction de leur position sur la plaque. Ainsi, la Figure 3-32 montre, pour la CMP STI, que le comportement de chacune des trois puces est différent.

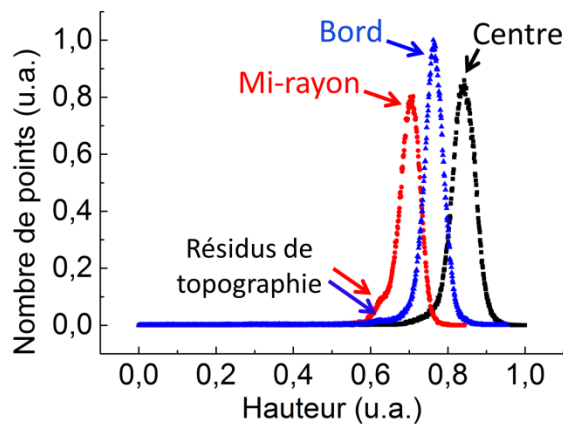


Figure 3-32 : Distribution des hauteurs de la puce située au centre, à mi-rayon et en bord de plaque après CMP STI.

Les puces situées à mi-rayon et en bord de plaque présentent des résidus de topographie qui se traduisent par un reste de la distribution des hauteurs des parties basses présentes avant CMP. Il est observé que l'amélioration de l'aplanissement conduit à une augmentation de l'amplitude de la topographie de la puce et donc à une augmentation de l'amplitude de la topographie des zones marginales (ici, décalage de la courbe vers la droite).

3.2 Caractérisation de l'évolution de la topographie cumulée

Nous avons vu durant les sections précédentes que les étapes de polissage mécano-chimique n'aplanissent pas complètement la surface. De plus, plusieurs procédés de fabrication ont lieu entre les différentes étapes de CMP. Ces procédés de fabrication sont, pour la plupart, d'un point de vue topographique, très conformes. Par conséquent, la topographie résiduelle de chaque polissage est présente lors du polissage suivant. Les plaques caractérisées jusqu'à maintenant ne présentaient pas de topographie résiduelle due à l'étape de polissage précédente. En effet, chaque plaque présentait uniquement un type de structures (STI, grille ou contact). Cette partie est consacrée à la caractérisation de l'évolution de la topographie au fil des différentes étapes de polissage mécano-chimique⁴⁸.

Les courbes d'exclusion de points permettent d'extraire le pourcentage (Tableau 3-4) et l'amplitude (Tableau 3-5) de topographie des zones marginales.

Pourcentage de zones marginales					
	STI	PMD	STI + PMD	Contacts	STI + PMD + Contacts
Centre	2,0%	2,0%	2,0%	0,5%	1,0%
Mi-rayon	2,7%	4,0%	3,0%	0,7%	2,0%
Bord	2,0%	2,0%	2,0%	0,7%	1,0%

Tableau 3-4 : Tableau du pourcentage de zones marginales de la puce située au centre, à mi-rayon et en bord de plaque pour la CMP STI, PMD et contacts, avec et sans la topographie provenant des étapes de CMP antérieures.

⁴⁸ Ces différentes étapes ainsi que leurs caractéristiques sont présentées section 1.1.

Comme mis en évidence pour une seule étape de polissage, le pourcentage de zones marginales est faible. Cependant, à ce stade de l'étude, il est difficile d'interpréter les variations entre les différents pourcentages des zones marginales.

Amplitude de topographie des zones marginales

	STI	PMD	STI + PMD	Contacts	STI + PMD + Contacts
Centre	0,78 u.a.	0,47 u.a.	0,39 u.a.	0,91 u.a.	0,58 u.a.
Mi-rayon	0,80 u.a.	0,49 u.a.	0,40 u.a.	0,90 u.a.	0,60 u.a.
Bord	0,76 u.a.	0,69 u.a.	0,69 u.a.	0,89 u.a.	0,57 u.a.

Tableau 3-5 : Tableau de l'amplitude de topographie des zones marginales de la puce située au centre, à mi-rayon et en bord de plaque pour la CMP STI, PMD et contacts, avec et sans la topographie provenant des étapes de CMP antérieures.

Le Tableau 3-5 montre que la présence de topographie provenant d'étapes de CMP antérieures ne change pas l'observation précédente indiquant que l'amplitude de topographie des zones marginales est identique quelle que soit la position de la puce sur la plaque. La puce en bord de plaque après CMP PMD avec tranchées d'isolation peu profondes (PMD + STI) présente, comme pour le polissage PMD seul, une anomalie topographique qui explique la forte amplitude de topographie des zones marginales. Il est également observé que l'amplitude de topographie des zones marginales est plus faible lors de la présence avant polissage d'une topographie provenant d'étapes de CMP antérieures.

Les Figure 3-33 et Figure 3-34 montrent la localisation des zones marginales en fonction des étapes de polissage subies par la puce. Aucune des zones marginales identifiées pour l'étape de CMP STI n'est transférée sur la topographie mesurée après CMP PMD + STI. Il apparaît que les variations du pourcentage de zones marginales observées Tableau 3-4 sont dues aux variations du procédé de CMP. Ainsi, selon la position de la puce sur la plaque, certaines zones marginales apparaissent ou disparaissent. Néanmoins, les zones dont l'amplitude de topographie est la plus élevée subsistent.

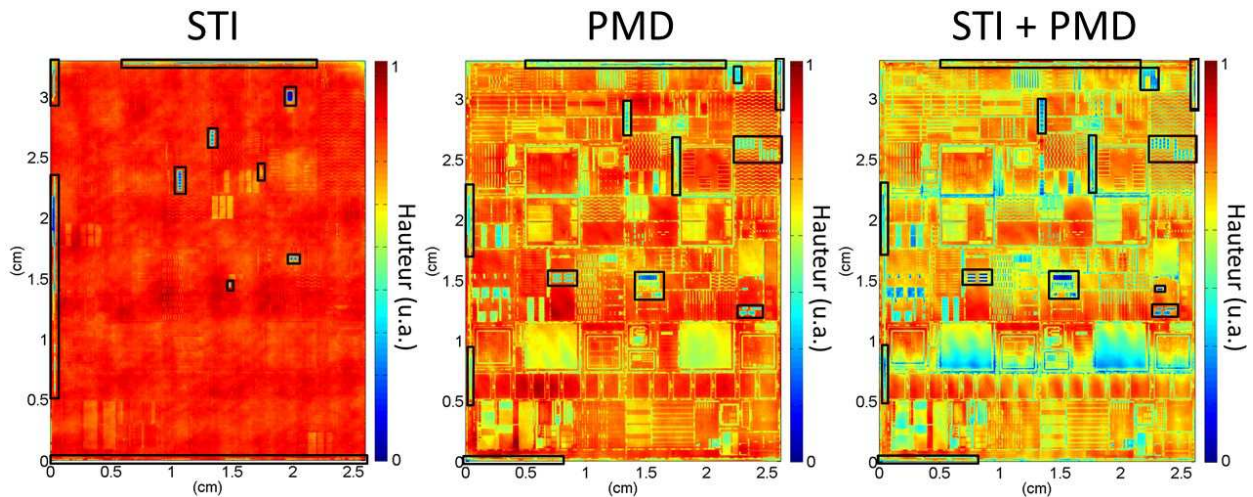


Figure 3-33 : Mesures obtenues par microscopie interférométrique des puces situées au centre de la plaque après CMP STI, après CMP PMD sans STI et après CMP PMD avec STI. Les localisations des zones marginales sont indiquées sur chaque cartographie.

La Figure 3-34 montre qu'une partie des zones marginales identifiées pour l'étape de CMP PMD est transférée sur la topographie mesurée après la CMP contacts. Les zones transférées sont celles dont l'amplitude de topographie est la plus élevée. De plus, il apparaît que les zones marginales identifiées lors de la caractérisation de la topographie induite par la CMP contacts, sans topographie antérieure, sont identiques.

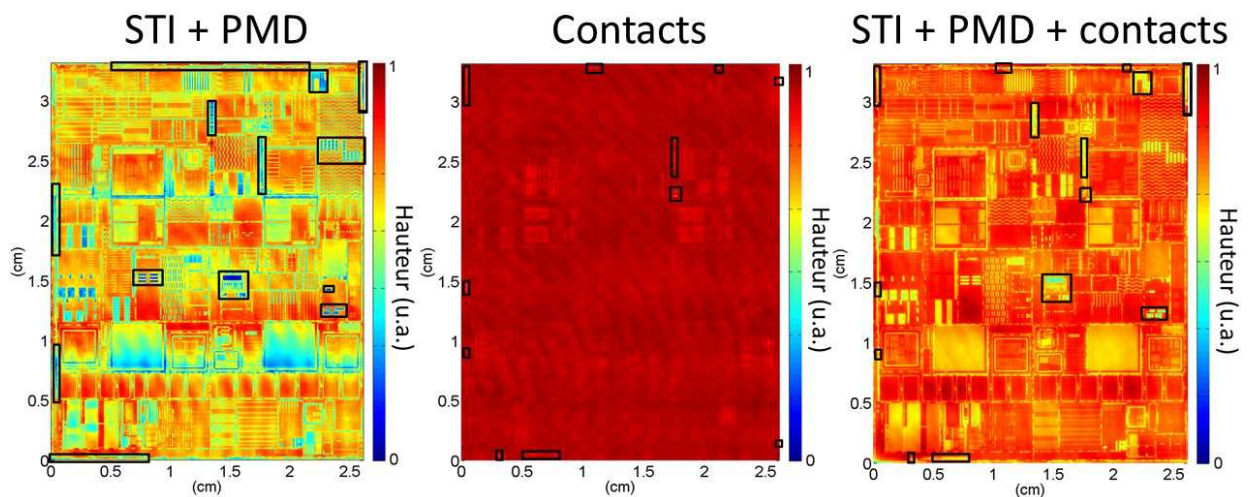


Figure 3-34 : Mesures obtenues par microscopie interférométrique des puces situées au centre de la plaque après CMP PMD avec STI, après CMP contacts sans grilles et STI et après CMP contacts avec grilles et STI. Les localisations des zones marginales sont indiquées sur chaque cartographie.

Ce résultat illustre ce qui a nécessité l'introduction du polissage mécano-chimique dans l'industrie microélectronique, à savoir, le cumul de la topographie des différents niveaux. La microscopie interférométrique permet désormais la caractérisation de ce phénomène et de ce fait son optimisation. Ces observations sont également valables pour les puces situées à mi-rayon et en bord de plaque.

Enfin, la Figure 3-35 donne une vision d'ensemble de l'évolution de la topographie du circuit intégré au fil des étapes de polissage mécano-chimique de la partie *Front-End-Of-Line* du nœud technologique 28 nm.

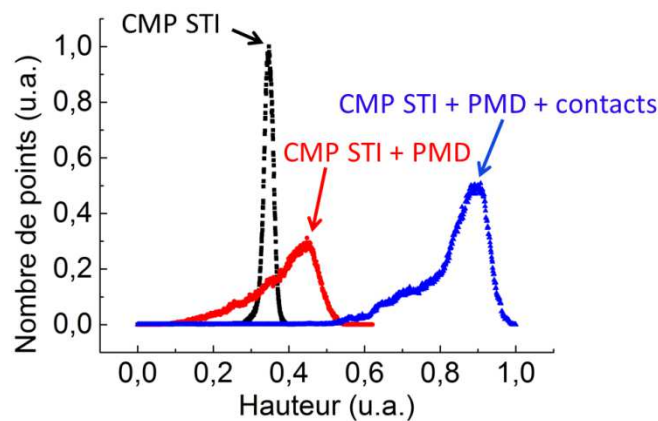


Figure 3-35 : Distribution des hauteurs de la puce située au centre de la plaque pour la CMP STI, la CMP PMD avec STI et la CMP contacts avec grilles et STI.

L'amplitude de la topographie du circuit intégré augmente pour chaque nouvelle étape de polissage. La Figure 3-35 montre également que la topographie résiduelle de la CMP PMD rend plus difficile l'aplanissement de la surface lors de la CMP contacts. En effet, sans topographie antérieure, cette dernière étape affichait, comme pour la CMP STI, une distribution gaussienne des hauteurs. Ceci explique la diminution de l'amplitude de topographie des zones marginales observée sur le Tableau 3-5. Néanmoins, il peut être observé sur la courbe représentant la distribution des hauteurs après CMP contacts que cette étape de polissage sélective permet de réduire la topographie résiduelle du polissage précédent. En effet, une gaussienne, caractéristique des étapes de polissage sélectives, est distinguable.

IV. Conclusions

Ce chapitre montre l'intérêt d'une mesure spatialement résolue ($3,6\ \mu\text{m}$) de la nano-topographie, induite par les procédés de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques. En effet :

- la quantité importante d'information, plusieurs dizaines de millions de points, générée par ce type de mesure a été exploitée ;
- la topographie des boîtes de mesure est non-représentative de celle du circuit intégré.

Une méthodologie a été introduite afin de tirer profit de la quantité importante d'information et fournir des valeurs représentatives de la topographie du circuit intégré. Cette méthodologie est basée sur l'utilisation de : l'amplitude de la topographie de la puce ; la courbe de distribution des hauteurs ; la courbe d'exclusion de points et la cartographie des hauteurs.

Cette méthodologie rend possible :

- l'extraction du pourcentage et de l'amplitude de la topographie des zones marginales⁴⁹ ;
- la localisation des zones marginales ;
- la caractérisation de l'impact topographique des zones marginales sur leurs voisinages ;
- la détermination, à l'aide des cartographies de densité de structures, des conditions d'apparition des zones marginales ;
- la caractérisation du comportement topographique d'un polissage à l'échelle d'un circuit intégré.

En conclusion, une caractérisation spatialement résolue ($3,6\ \mu\text{m}$) de la nano-topographie, induite par les procédés de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques donne accès à de nouveaux paramètres plus représentatifs que ceux actuellement utilisés. Il est possible de caractériser la topographie d'un circuit intégré induite par chacune des étapes constituant les procédés de polissage. De plus, la technique est utilisable pour la caractérisation

⁴⁹ Une zone marginale est une portion de la topographie de l'échantillon représentée par peu de points et présentant une différence de hauteur importante vis-à-vis du reste de la topographie.

d'autres procédés tels que le dépôt ou la photolithographie qui sont directement liés au polissage mécano-chimique.

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'efficacité de la mesure de lumière diffusée pour le contrôle de la nano-topographie, induite par les procédés de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques. La première partie introduit le principe de la mesure et la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle. La seconde partie est dédiée à la description de l'équipement et des échantillons utilisés. La méthodologie employée est ensuite détaillée. La troisième partie porte sur les résultats. La sensibilité de la mesure à la densité de structures, à la non uniformité de polissage à l'échelle de la plaque et à la nano-topographie des grilles est étudiée. Enfin, des résultats issus de simulations sont présentés.

Chapitre 4 : Etude de l'efficiencia de la mesure de lumière diffusée pour le contrôle de la nano-topographie sur des distances centimétriques : application au polissage mécano-chimique

I. Principe et intérêt de la technique

1.1 Introduction

L'étude de la surface des objets à partir de leurs propriétés réfléchissantes a suscité dès l'antiquité un grand intérêt. Les progrès successifs de l'optique géométrique (lois de Snell-Descartes) et de l'optique physique (équations de Maxwell) ont par la suite permis d'élargir le champ des recherches et de mieux caractériser les interactions entre la surface des objets et la lumière. En effet, la lumière peut subir différentes interactions avec la surface d'un objet. On citera par exemple : l'absorption, la transmission, la réfraction, la réflexion - ou réflexion spéculaire, la diffusion de volume ou encore la diffusion de surface encore appelée réflexion diffuse. Ce chapitre porte sur la possibilité, en utilisant la lumière diffusée, de contrôler la nano-topographie de la puce induite par les procédés de polissage mécano-chimique.

Nous nous plaçons tout d'abord dans le cadre de l'optique géométrique. L'optique géométrique est une approximation de l'optique physique et permet de décrire le comportement de la lumière quand la longueur d'onde de celle-ci est grande vis-à-vis des obstacles rencontrés. Dans

ce contexte les phénomènes de diffraction et d'interférences sont négligeables. La lumière est alors décrite uniquement en termes de rayons lumineux qui caractérisent sa direction de propagation. L'optique géométrique est fondée sur le principe de Fermat. Ce dernier dit que : « le chemin effectivement parcouru par la lumière entre deux points est tel que le temps de parcours est stationnaire (maximal ou minimal) par rapport aux trajets voisins ». Ce principe implique que la lumière se propage en ligne droite⁵⁰ ainsi qu'une réciprocité du trajet lumineux entre source et destination.

Les lois de Snell et Descartes, basées sur l'optique géométrique, définissent le comportement de la lumière lorsque celle-ci rencontre une surface.

Les lois de Snell et Descartes indiquent que la lumière réfléchie forme un angle à la normale à la surface égal à l'angle entre la direction incidente et la normale à la surface. Ces trois directions sont coplanaires. Dans le cas d'un miroir lisse parfait, encore appelé surface de Fresnel la lumière ne peut être aperçue que dans cette direction de réflexion. Il s'agit de la réflexion spéculaire. Dans le cas d'une surface réelle on observe de la lumière en dehors de la direction spéculaire. On parle de lumière diffusée (Figure 4-1).

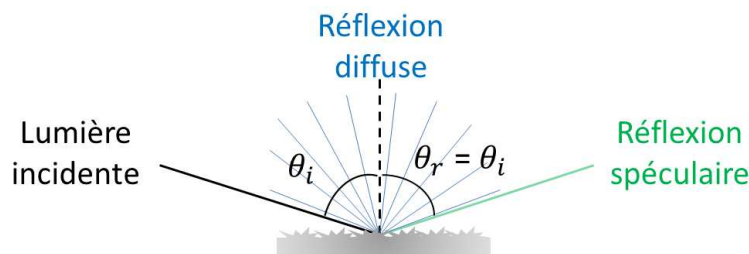


Figure 4-1 : Illustration du comportement de la lumière lors de sa réflexion sur la surface d'un objet de la vie courante.

L'étude de la lumière réfléchie (spéculaire et diffuse) est rattachée au domaine de la radiométrie.

⁵⁰ Dans un milieu homogène et isotrope.

1.2 La fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle

Le domaine de la radiométrie étudie la mesure des rayonnements électromagnétiques. Le terme de photométrie visuelle peut être employé lorsque ces rayonnements appartiennent au spectre visible. Cette étude utilise la nomenclature du domaine de la radiométrie et porte dans un premier temps sur un rayonnement électromagnétique monochromatique.

Les valeurs couramment utilisées dans ce domaine sont :

- la puissance, ou flux rayonnant, désignée par Φ . Elle s'exprime en Watts (W) et est égale à l'énergie totale rayonnée par unité de temps ;
- l'éclairement énergétique, ou irradiance, désigné par E . Cette valeur représente la puissance par unité de surface. Elle s'exprime en (W/m²) ;
- la radiance L . Elle est définie comme la puissance par unité de surface et par angle solide. Elle s'exprime en (W/(sr.m²)).

Soit A l'aire totale de la surface irradiée et dA un élément de cette surface.

L'éclairement énergétique de l'élément d'aire dA_i centré au point (x_i, y_i) , par l'élément de flux rayonnant $d\Phi_i(x_i, y_i)$ est donné par :

$$E_i(x_i, y_i) = \frac{d\Phi_i(x_i, y_i)}{dA_i}. \quad (4-1)$$

La radiance incidente au point (x_i, y_i) dans la direction (θ_i, φ_i) s'écrit :

$$L_i(x_i, y_i, \theta_i, \varphi_i) = \frac{d\Phi_i(x_i, y_i)}{\cos\theta_i d\omega_i dA_i} = \frac{E_i(x_i, y_i)}{\cos\theta_i d\omega_i}. \quad (4-2)$$

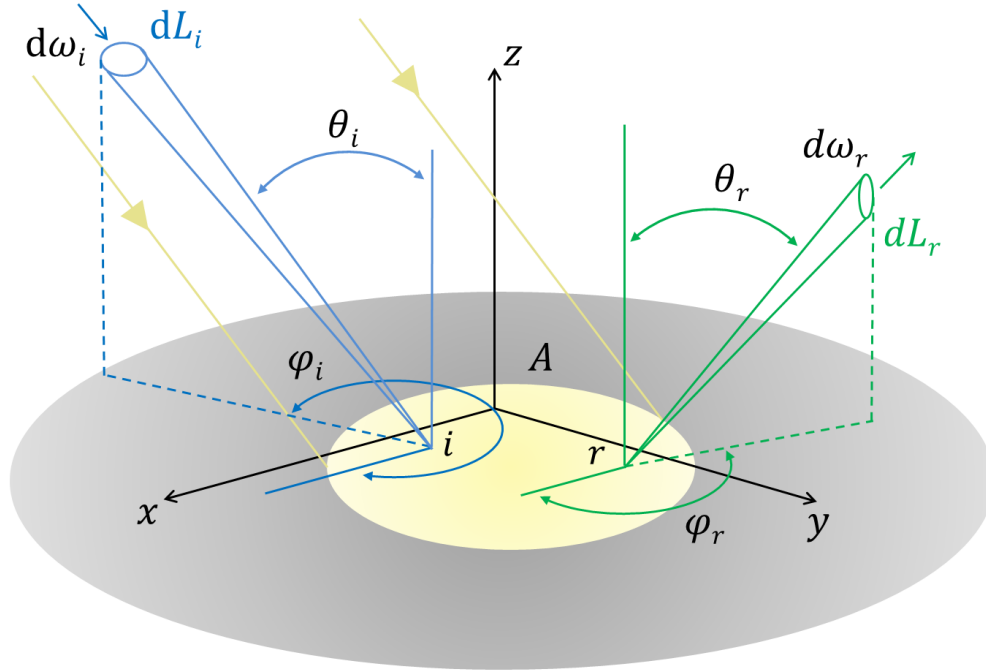


Figure 4-2 : Géométrie de la radiance incidente dL_i et de la radiance réfléchie dL_r . $d\omega_i$ et $d\omega_r$ sont des angles solides et A est une aire.

L'élément d'éclairement énergétique $dE_i(x_i, y_i)$ est à l'origine de la radiance réfléchie à partir du point (x_r, y_r) dans la direction (θ_r, φ_r) . Cette dernière s'écrit :

$$dL_r(\theta_i, \varphi_i, x_i, y_i, \theta_r, \varphi_r, x_r, y_r) = S(\theta_i, \varphi_i, x_i, y_i, \theta_r, \varphi_r, x_r, y_r) d\Phi_i(x_i, y_i) \quad (4-3)$$

où $S(\theta_i, \varphi_i, x_i, y_i, \theta_r, \varphi_r, x_r, y_r)$ est la fonction de distribution de la réflectance de surface diffusante bidirectionnelle ou BSSRDF pour *bidirectional scattering-surface reflectance distribution function* (Nicodemus 1977). Cette fonction permet d'exprimer quantitativement le lien entre la radiance réfléchie et le flux incident. Elle prend en considération les interactions entre le rayonnement électromagnétique incident et la matière, telles que la diffusion de volume. Ainsi, comme illustré sur la Figure 4-2, le point de sortie de la matière du flux réfléchi (x_r, y_r) peut être différent du point d'entrée dans la matière du flux incident (x_i, y_i) .

Les équations (4-1) et (4-3) permettent d'écrire :

$$\begin{aligned}
\int_{A_i} dL_r(\theta_i, \varphi_i, x_i, y_i, \theta_r, \varphi_r, x_r, y_r) \\
= dE_i(x_i, y_i) \int_{A_i} S(\theta_i, \varphi_i, x_i, y_i, \theta_r, \varphi_r, x_r, y_r) dA_i
\end{aligned} \tag{4-4}$$

soit :

$$\int_{A_i} dL_r(\theta_i, \varphi_i, x_i, y_i, \theta_r, \varphi_r, x_r, y_r) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) dE_i(x_i, y_i) \tag{4-5}$$

où :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \int_{A_i} S(\theta_i, \varphi_i, x_i, y_i, \theta_r, \varphi_r, x_r, y_r) dA_i. \tag{4-6}$$

$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ est la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle ou BRDF pour *Bidirectionnal Reflectance Distribution Function* (Nicodemus 1977). Cette dernière permet de caractériser la radiance réfléchie par la totalité de la surface irradiée dans la direction ω_r en fonction de l'éclairement énergétique provenant de la direction ω_i . En considérant que la radiance réfléchie est issue uniquement de la surface irradiée A on peut écrire la BRDF sous sa forme la plus souvent utilisée :

$$\boxed{f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(x_i, y_i)}} \tag{4-7}$$

La BRDF doit :

- obéir au principe de réciprocité de Helmholtz ou principe du retour inverse de la lumière et est donc symétrique en ω_r et ω_i , d'où son qualificatif bidirectionnelle :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = f_r(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i) ; \quad (4-8)$$

- respecter la loi de conservation de l'énergie. L'énergie totale de la lumière réfléchie dans une direction doit être plus petite ou égale à l'énergie totale de la lumière incidente, pour toute direction sortante ω_r , soit :

$$\int_{H^2} f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos(\theta_r) d\omega_r \leq 1. \quad (4-9)$$

Où H^2 est une hémisphère de coordonnées polaires, θ_r allant de 0 à π et φ_r allant de 0 à 2π .

Lorsque la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle dépend de la longueur d'onde de la lumière incidente, cette dernière se nomme fonction de distribution de la réflectance spectrale bidirectionnelle.

De nombreux modèles empiriques ou théoriques de la BRDF ont été établis afin de simuler et investiguer la diffusion de la lumière.

1.3 Modèles de fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle

La BRDF dépend des caractéristiques topographiques de la surface. Afin d'obtenir une modélisation précise de la réflectance spectrale bidirectionnelle, deux solutions se présentent. La première consiste à déterminer le relief exact de la surface, ce qui requiert une précision de mesure généralement impossible à atteindre. La seconde consiste à modéliser les irrégularités de la surface par un processus aléatoire donnant lieu à un modèle de distribution de la hauteur de la surface ou à un modèle de distribution de la pente de la surface.

Les modèles d'éclairage explicitant la réflectance bidirectionnelle des surfaces d'objets réels se basent sur trois approches possibles. La première, l'approche empirique, ne tient pas compte des modèles de surface. Elle cherche à fournir un modèle d'éclairage aussi simple que

possible, totalement déconnecté de la modélisation des phénomènes impliqués (Lambert 1760; Phong 1975; Blinn 1977; Ward 1992). L'approche géométrique et l'approche physique, s'appuient toutes deux sur l'étude théorique de la réflexion pour calculer la réflectance bidirectionnelle. L'approche géométrique se place dans le contexte de l'optique géométrique qui suppose que les dimensions latérales des irrégularités de la surface sont grandes par rapport à la longueur d'onde de la lumière incidente (Torrance and Sparrow 1967; Oren and Nayar 1994; Ashikhmin, Premoze et al. 2000). Cette hypothèse est souvent compatible avec les modèles de surfaces rugueuses, mais n'est pas valide pour les surfaces lisses. Dans ce cas, l'approche physique doit être adoptée et il faut revenir à la théorie des ondes électromagnétiques pour construire un modèle de réflectance pertinent (Beckmann and Spizzichino 1963; He, Torrance et al. 1991). Celui-ci sera généralement plus complexe, mais sera à même de représenter aussi bien une surface lisse qu'une surface rugueuse. Selon le modèle, seule la réflexion spéculaire ou la réflexion diffuse est simulée. Pour les modèles les plus élaborés les deux types de réflexion sont considérés.

Voici quelques-uns des principaux modèles traitant au minimum uniquement de la réflexion diffuse :

Le modèle de Lambert (approche empirique, réflexion diffuse uniquement)

Le modèle d'éclairage de Lambert (Lambert 1760) est le plus vieux modèle d'éclairage connu et reste à ce jour le plus couramment utilisé. Ce modèle s'applique aux diffuseurs parfaits qui émettent une luminance constante dans toutes les directions. La lumière incidente pénètre à l'intérieur du matériau et est absorbée, réfléchi et réfractée. Une partie seulement arrive à ressortir dans toutes les directions. La surface Lambertienne correspond au cas particulier où la luminance est indépendante de la direction d'observation. Sa réflectance bidirectionnelle est alors de la forme :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{R(\lambda)}{\pi} \quad (4-10)$$

où $R(\lambda)$ est la réflectance de la surface, égale au rapport entre le flux réfléchi et le flux incident.

Ce modèle, très simple, donne des résultats très satisfaisants.

Le modèle d'Oren et Nayar (approche géométrique, réflexion diffuse uniquement)

Oren et Nayar (Oren and Nayar 1994) proposent une nouvelles approche des surfaces qui ne sont, ni lambertiennes, ni réfléchissantes, comme par exemple l'argile, le sable ou certains plastiques et tissus. Ils considèrent que ces surfaces sont constituées d'un ensemble de petits éléments diffusants qui suivent la loi de Lambert. Ils sont distribués selon le modèle de distribution de la pente. Le modèle d'Oren et Nayar s'applique aussi bien aux surfaces isotropes que non isotropes et prend en compte les phénomènes d'ombrage, de masquage et de réflexions multiples (Figure 4-3).

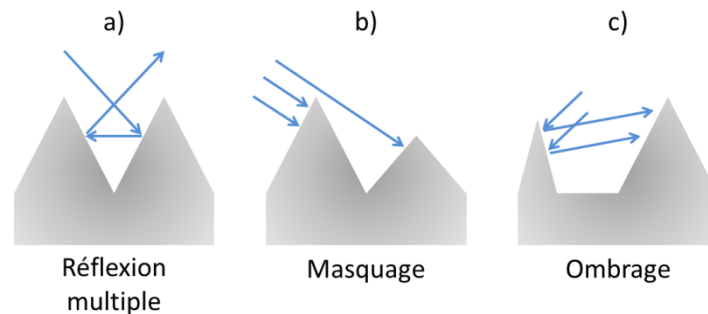


Figure 4-3 : Illustration des phénomènes de a) réflexion multiple ; b) masquage ; c) ombrage qui peuvent survenir lors d'une mesure de lumière réfléchie.

Il décrit les surfaces diffusantes lisses et rugueuses et il ne dépend que de la rugosité de la surface caractérisée par σ , écart type de la distribution gaussienne de la pente. Pour une surface lisse, $\sigma = 0$, cela correspond au modèle de Lambert. Pour une surface rugueuse, la réflectance n'est pas uniforme. Lorsque l'angle d'incidence est faible la réflectance se rapproche des valeurs prédites par le modèle de Lambert. Quand il est important, les différences sont très marquées, notamment en raison des réflexions multiples.

Le modèle de He (approche physique, réflexion diffuse et spéculaire)

He (He, Torrance et al. 1991) a construit un modèle de réflectance bidirectionnelle basé sur l'optique physique. Il a repris les idées des deux grands pionniers de cette approche : Beckmann

et Spizzichino (Beckmann and Spizzichino 1963) d'une part, Stogryn (Stogryn 1967) d'autre part. Ainsi, presque tous les phénomènes physiques impliqués dans la réflexion et la diffusion de la lumière (polarisation, diffraction, interférences, masquage, ombrage) sont inclus dans ce modèle qui permet la description de nombreux matériaux lisses et rugueux. Le modèle de surface isotrope adopté est une distribution gaussienne de la hauteur, qui nécessite deux paramètres : la rugosité de la surface caractérisée par σ , écart type de la distribution gaussienne de hauteurs et la longueur de corrélation. Les deux autres paramètres du modèle sont l'indice de réfraction de la surface qui dépend de la longueur d'onde et le coefficient de diffusion lambertien $R(\lambda)$.

L'expression finale de la réflectance bidirectionnelle (Figure 4-4) construite par He se décompose en trois termes : spéculaire (s), diffus directionnel (dd) et diffus uniforme (du) :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = R_s + R_{dd} + R_{du}. \quad (4-11)$$

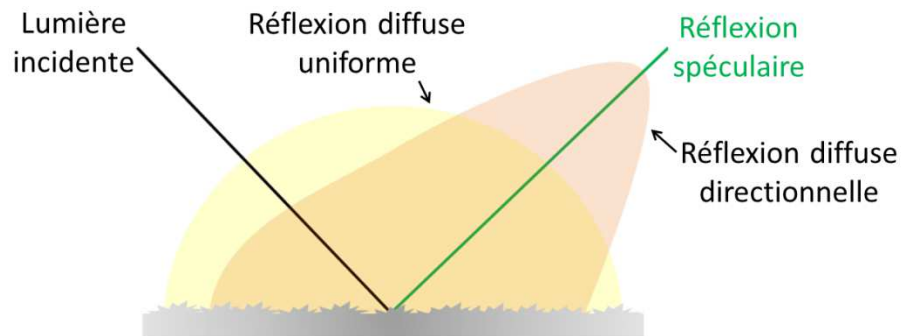


Figure 4-4 : Illustration de la distribution de la réflectance selon le modèle de He.

La classification proposée par Nayar (Nayar, Ikeuchi et al. 1991) en pic spéculaire, lobe spéculaire et diffusion, qui lui permettait de faire la fusion des modèles de Beckmann et Spizzichino et de Torrance et Sparrow (Torrance and Sparrow 1967) est retrouvée. La composante spéculaire de He provient de la réflexion unique de la lumière sur le niveau moyen de la surface. Dans le cas d'une surface lisse, cette composante prédomine sur les autres et un pic spéculaire est effectivement observé. La composante diffuse directionnelle est due à la réflexion unique de la lumière sur la rugosité de la surface (phénomène de diffraction). La

troisième composante est attribuée aux réflexions multiples et aux interactions de la lumière avec la matière de la surface. He a tout simplement repris la réflectance bidirectionnelle de Lambert pour ce terme diffus uniforme.

Le terme spéculaire de la réflectance de He et al. l'emporte sur le terme diffus directionnel pour les surfaces lisses, c'est à dire quand $\lambda \gg \sigma \cos \theta_i$. Quand la rugosité augmente, $\lambda \approx \sigma \cos \theta_i$, la diffraction et les interférences commencent à intervenir et le terme diffus directionnel devient dominant. Le terme diffus uniforme est considéré par le modèle de He comme un paramètre, qui doit obéir à la contrainte de conservation de l'énergie. L'ajustement de ce paramètre est difficile ce qui rend l'utilisation de ce modèle laborieuse. Il n'en reste pas moins le meilleur modèle physique actuellement développé décrivant de nombreuses surfaces et l'essentiel des phénomènes optiques présents dans la nature.

L'analyse rigoureuse d'ondes couplées (approche physique, réflexion diffuse et spéculaire)

L'analyse rigoureuse d'ondes couplées ou RCWA pour *Rigorous Coupled Wave Analysis* permet de calculer la réflectance d'un réseau. Contrairement aux autres modèles ce dernier adresse uniquement des surfaces périodiques à caractère non aléatoire et dont les caractéristiques géométriques sont connues. Ce modèle, introduit en 1981 par M. G. Moharam et T. K. Gaylord (Moharam and Gaylord 1981) est destiné aux réseaux planaires avant d'être étendu à tous les types de réseau. Il s'appuie sur la démonstration d'équivalence (Magnusson and Gaylord 1978) de l'approche modale (Tamir, Oliner et al. 1964), basée sur la décomposition en séries de Fourier, et de l'approche d'ondes couplées (Aggarwal and Parthasarathy 1951). La RCWA proposée par M. G. Moharam et T. K. Gaylord est la première à fournir des calculs précis de la réflectance d'un réseau.

Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell et la décomposition du champ électromagnétique et de la fonction de permittivité diélectrique en série de Fourier. Pour cette raison, il est également appelé "méthode modale par développement de Fourier".

Le réseau est discrétisé dans la direction z en considérant un ensemble de couches d'épaisseur d au sein desquelles la permittivité $\varepsilon_p(x)$ est considérée constante en fonction de z (Figure 4-5).

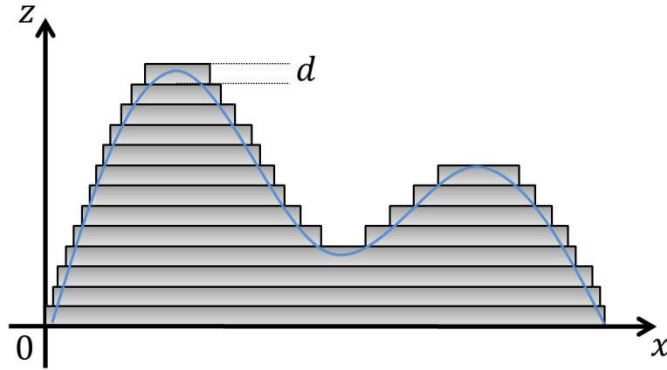


Figure 4-5 : Discretisation, suivant z , du réseau en couches d'épaisseur d selon le modèle d'analyse rigoureuse d'ondes couplées. Chaque couche a une permittivité constante selon z . Le nombre de couches doit être suffisant de manière à approcher le profil réel de la distribution de la permittivité du réseau.

Le champ électromagnétique est déterminé dans chaque couche du réseau par l'approche des ondes couplées (développement de Rayleigh). Les conditions aux limites imposées par les équations de Maxwell, continuité aux interfaces des composantes tangentielles de \vec{E} et \vec{H} , sont appliquées séquentiellement à chaque interface de manière à obtenir l'amplitude des champs diffractés transmis et réfléchis.

La connaissance des caractéristiques géométriques de la surface telle que le pas du réseau ou la largeur des structures permet l'utilisation de ce modèle dans notre étude.

Le nombre important de modèles illustre bien la multiplicité et la complexité des phénomènes impliqués dans la réflectance d'une surface. Néanmoins, l'utilisation d'un modèle adapté et de la mesure de lumière diffusée pourraient permettre de déterminer la morphologie des surfaces.

1.4 Intérêt de la mesure de lumière diffusée

Dans l'industrie microélectronique, la mesure de lumière diffusée est généralement utilisée pour détecter, compter et classifier par diamètre les particules présentes sur des surfaces non structurées et composées d'un seul matériau.

L'intérêt de la mesure de la lumière diffusée pour le contrôle de la nano-topographie, induite par le procédé de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques est suscité principalement par :

- la rapidité de la mesure, une à trois minutes pour toute la surface d'une plaque 300 mm ;
- la non destructivité de la mesure car elle s'effectue sans contact avec la surface des plaques ;
- la présence dans les unités de fabrication de nombreux équipements permettant cette mesure (équipements utilisés actuellement pour des mesures de défektivité) ;
- la bibliographie importante démontrant la sensibilité de la mesure.

La mesure de lumière diffusée a été utilisée, entre autres, par : Holsteyns pour contrôler et qualifier des procédés de dépôts chimiques en phase vapeur et des procédés de dépôts physiques en phase vapeur (Holsteyns, Roels et al. 2003) ; Xu qui exploite la sensibilité de la mesure pour contrôler la taille et la concentration en surface de particules nanométriques de SiO_2 (Xu, Vos et al. 2003; Xu, Vos et al. 2003) ; Suratwala pour quantifier les résidus d'abrasif dans le cas du polissage du verre (Suratwala, Miller et al. 2005), Arrazat qui caractérise la stabilité thermique du $\text{NiSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ par la mesure de la lumière diffusée (Arrazat, Danel et al. 2007) ; Halder pour évaluer l'efficacité du retrait de résidus de résine (Halder, Vos et al. 2009) ; Zheng pour caractériser ou contrôler la rugosité de surface d'une manière rapide et sans contact (Zheng, Zhou et al. 2010). Il est important de souligner que la bibliographie fait uniquement état d'applications sur des plaques non structurées. De plus, l'utilisation d'outils de simulation est la plupart du temps absente.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'efficacité de la mesure de lumière diffusée pour le contrôle de la nano-topographie, induite par le procédé de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques. Néanmoins, comme cela a été évoqué, la génération de lumière diffusée par la surface d'un objet fait intervenir de nombreux phénomènes. Pour ces raisons, dans un premier temps, nous avons privilégié une approche expérimentale basée sur des mesures de lumière diffusée associée à diverses caractérisations complémentaires. Dans un second temps, un outil de simulation est utilisé dans le but de mieux appréhender les phénomènes mis en jeu lors de la mesure de lumière diffusée. Cette seconde partie s'appuie sur les données expérimentales générées durant la première partie de l'étude.

II. Conditions expérimentales

2.1 Description de l'équipement

L'équipement utilisé pour les mesures de lumière diffusée est un Surfscan SP1 DLS (*Dual Light Scattering*) de marque KLA Tencor (Figure 4-6).

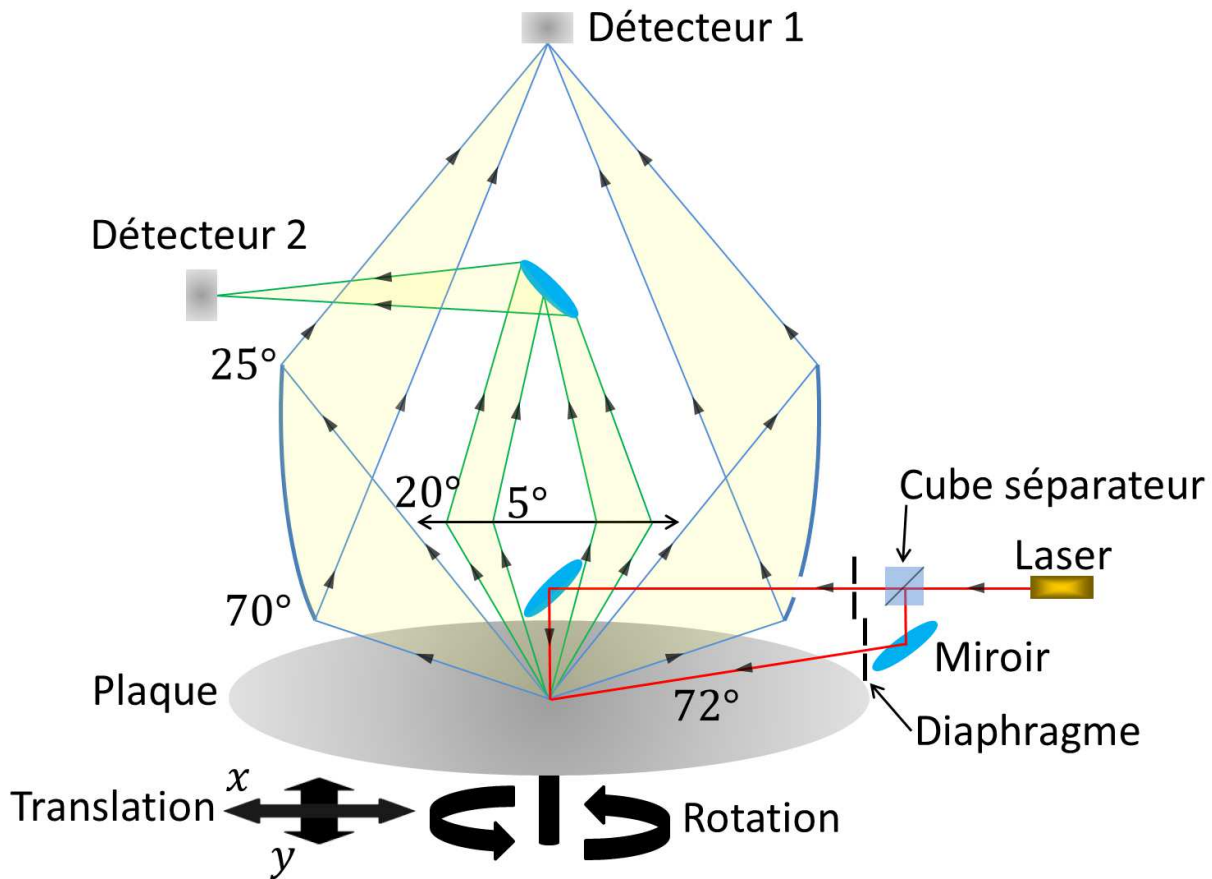


Figure 4-6 : Schéma technique de l'équipement de mesure de lumière diffusée, Surfscan SP1 DLS (Dual Light Scattering) de marque KLA Tencor. Le faisceau incident est un laser argon monochromatique ($\lambda = 488 \text{ nm}$) qui peut être soit en incidence normale, soit en incidence oblique. Des diaphragmes, un cube séparateur et des miroirs permettent de choisir l'incidence du laser. La lumière diffusée est récoltée par deux détecteurs. Ces derniers reçoivent la lumière par le biais d'un miroir ellipsoïdale et d'une lentille. Le détecteur 1, associé à la lentille, couvre des angles de diffusion s'étendant de 5° à 20° . Ce détecteur est nommé détecteur étroit pour la suite de cette étude. Le détecteur 2, associé au miroir ellipsoïdal, couvre des angles de diffusion s'étendant de 25° à 70° . Ce détecteur est nommé détecteur large pour la suite de cette étude⁵¹. Des éléments polarisant la lumière incidente et filtrant la lumière diffuse, non représentés sur le schéma, sont également présents.

Durant la mesure le laser est fixe et la plaque est déplacée par un mouvement de rotation et de translation. Ceci permet au laser de balayer toute la plaque en suivant une trajectoire en spirale

⁵¹ L'équipementier ne souhaitant pas fournir ce type d'information, nous supposons que le miroir permettant au faisceau laser d'atteindre la surface en incidence normale bloque la lumière diffusée suivant des angles inférieurs à 5° .

dont l'origine et le centre de la plaque. L'intensité de la lumière diffusée mesurée est donc localisée (Figure 4-7).

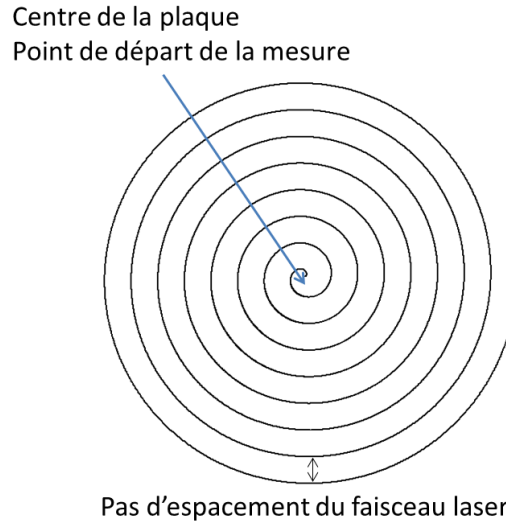


Figure 4-7 : Représentation de la trajectoire du faisceau laser lors de la mesure. Le laser est immobile, c'est la plaque qui se déplace.

Différents paramètres sont ajustables pour effectuer la mesure. Ainsi, le laser illumine la surface, soit en incidence oblique (72° par rapport à la normale à la surface), soit en incidence normale (à la surface). La polarisation de la lumière incidente, la polarisation de la lumière réfléchie et le pas d'espacement entre deux balayages du laser sont également des paramètres de mesure. Un pas élevé permet un balayage rapide de la plaque, mais moins de surface est balayée par le laser. Le faisceau est circulaire ou elliptique et sa taille est de quelques dizaines de micromètres de diamètre (ou grand axe). La taille du faisceau varie en fonction de l'incidence du laser et du pas d'espacement des balayages.

La quantité de lumière diffusée mesurée est définie de la manière suivante :

$$I_{diffusée} = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} I_{diffusée}(\theta, \varphi) d\theta d\varphi}{I_0} \text{ ppm} \quad (4-12)$$

où I_0 désigne l'intensité du faisceau incident⁵² et $I_{diffusée}(\theta, \varphi)$ désigne l'intensité de lumière diffusée dans la portion de l'espace définie par les angles polaires θ_1 et θ_2 et les angles azimutaux φ_1 et φ_2 .

L'intensité de la lumière diffusée est habituellement utilisée pour la détection de particules sur une surface. Pour cela on mesure l'intensité de lumière diffusée par la surface d'une plaque en absence de particules. On définit ensuite, à partir de cette valeur, une intensité de lumière diffusée, légèrement supérieure, que l'on appelle niveau de détection bas. La présence de particules est mise en évidence par une intensité de lumière diffusée supérieure au niveau de détection bas. Un niveau de détection haut, fonction du niveau de détection bas est également définie (Figure 4-8).

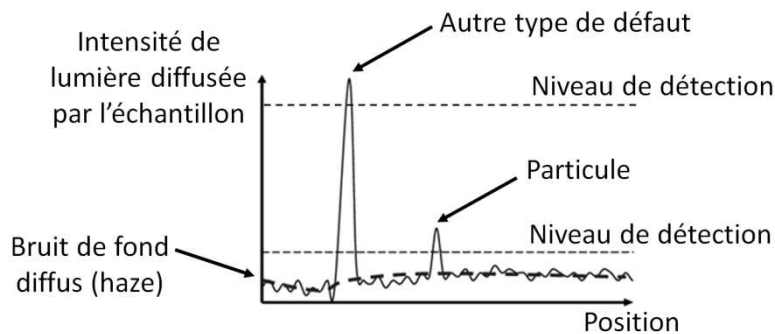


Figure 4-8 : Illustration du principe de détection de particules par mesure de lumière diffusée.

La classification par taille des particules détectées est faite à l'aide d'un découpage en intensité de la gamme définie par la limite basse et haute. Au-delà de la limite haute l'anomalie n'est plus classifiée en tant que particule mais en tant qu'autre défaut tel qu'un agglomérat de particules ou une rayure. Ce travail de thèse porte sur la mesure d'intensité de lumière diffusée et non sur la détection particulaire, par conséquent, l'ensemble des intensités de lumière diffusée est pris en compte.

⁵² Nous supposons que l'intensité du faisceau incident, I_0 , est mesurée avant chaque mesure. L'équipementier n'a pas souhaité communiquer sur ce sujet.

2.2 Description des plaques utilisées

Les différentes plaques utilisées dans ce chapitre sont générées à partir des masques de production des nœuds technologiques 45 nm et 65 nm (largeur minimale de la grille des transistors).

Cette étude s'intéresse à l'un des procédés de polissage mécano-chimique apparu avec l'intégration « gate-last » introduite par Intel (Figure 4-9).

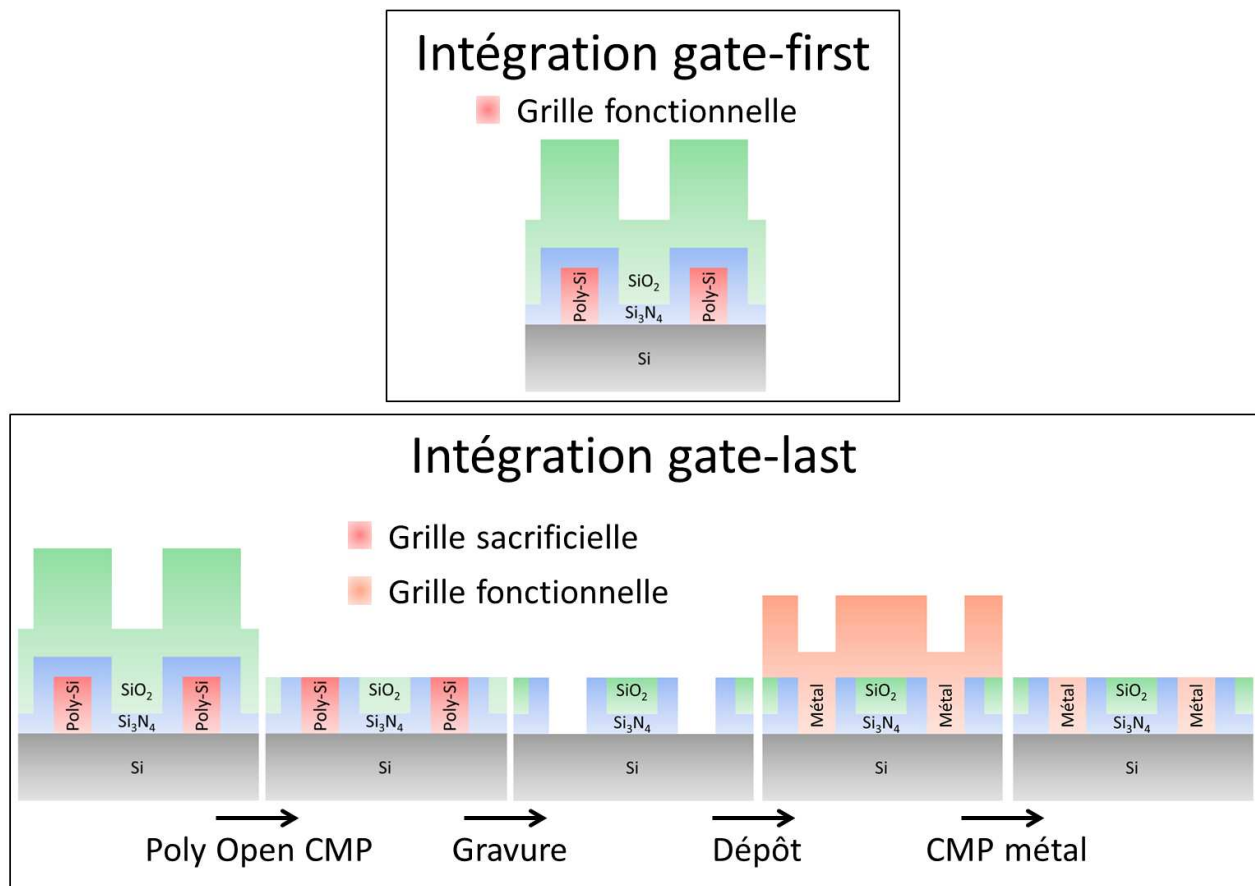


Figure 4-9 : Illustration des intégrations gate-first et gate-last.

Les autres acteurs de l'industrie microélectronique utilisent actuellement l'intégration « gate-first » au cours de laquelle la grille du transistor est élaborée durant les premières étapes de la partie *Front-End-Of-Line* du processus de fabrication des puces. De ce fait la grille du transistor subit tous les recuits postérieurs à sa fabrication ce qui entraîne entre autres une modification

de ses propriétés électriques. L'intégration « gate-last » introduit l'utilisation d'une grille sacrificielle subissant tous les recuits. Cette grille est remplacée par une grille métallique à la fin de la partie *Front-End-Of-Line*.

L'intégration « gate-last » est rendue possible grâce au procédé de polissage mécano-chimique *Poly Open CMP* ou POC. Ce procédé est réalisé en deux étapes (Figure 4-10).

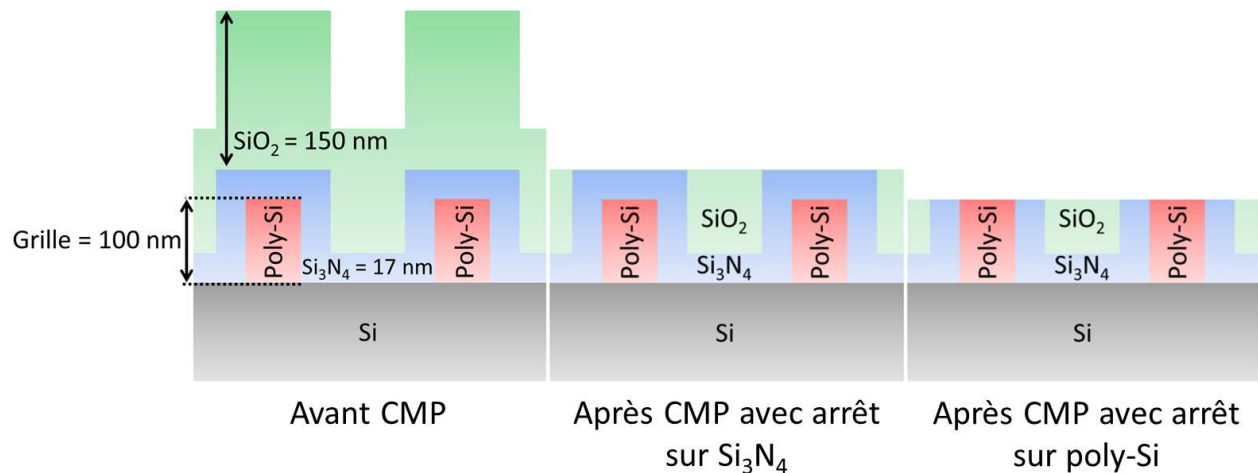


Figure 4-10 : Description des plaques utilisées durant ce chapitre et représentation des différentes étapes du polissage mécano-chimique *Poly Open CMP* : avant polissage, après polissage arrêt sur Si_3N_4 et après polissage avec arrêt sur silicium poly-cristallin⁵³.

La première étape est un polissage avec arrêt sur nitrure de silicium. La seconde étape est un polissage avec arrêt sur silicium poly-cristallin. Ce procédé est critique car :

- il ne doit laisser aucuns résidus de Si_3N_4 sur le silicium poly-cristallin quelle que soit la zone de la puce. En effet, le retrait de la grille sacrificielle est effectué par gravure chimique et la présence de résidus bloque la gravure. Dans cette éventualité la plaque devient inutilisable. Il n'existe pas à l'heure actuelle de technique permettant de contrôler la présence de résidus sur les grilles ;
- il dicte la hauteur de la grille métallique pour laquelle sont calibrés les procédés suivants.

Le Tableau 4-1 récapitule les plaques utilisées lors de cette étude.

⁵³ Les paramètres de ces procédés de polissage sont décrits dans la suite de l'étude.

	Technologie	CMP avec arrêt sur Si ₃ N ₄	Temps	Chimie	CMP avec arrêt sur poly-Si	Temps	Chimie
Plaque 1	45 nm	non					
Plaque 2	65 nm	non					
Plaque 3	45 nm	oui	t1	Sélective Si ₃ N ₄	non		
Plaque 4	45 nm	oui	t2 > t1	Sélective Si ₃ N ₄	non		
Plaque 5	45 nm	oui	t3 > t2	Sélective Si ₃ N ₄	non		
Plaque 6	45 nm	oui	t3	Sélective Si ₃ N ₄	oui	t1	Sélective SiO ₂
Plaque 7	45 nm	oui	t3	Sélective Si ₃ N ₄	oui	t2 > t1	Sélective SiO ₂
Plaque 8	45 nm	oui	t3	Sélective Si ₃ N ₄	oui	t3 > t2	Sélective SiO ₂
Plaque 9	45 nm	oui	t3	Sélective Si ₃ N ₄	oui	t1	Non sélective SiO ₂
Plaque 10	45 nm	oui	t3	Sélective Si ₃ N ₄	oui	t2 > t1	Non sélective SiO ₂
Plaque 11	45 nm	oui	t3	Sélective Si ₃ N ₄	oui	t3 > t2	Non sélective SiO ₂

Tableau 4-1 : Récapitulatif des plaques utilisées durant cette étude. La technologie fait référence à la largeur minimale des grilles. La colonne « temps » indique la durée du procédé de polissage. Les durées « t1 », « t2 » et « t3 » des deux étapes de polissage sont indépendantes. Une chimie est dite sélective à un matériau lorsque la vitesse d'enlèvement de ce matériau est inférieure aux vitesses d'enlèvement des autres matériaux présents.

La méthodologie utilisée durant cette étude est présentée.

2.3 Méthodologie

Afin de pouvoir détailler la méthodologie employée, l'interface équipement, c'est-à-dire l'ensemble des informations auxquelles l'utilisateur a accès, est décrite.

La Figure 4-11 présente l'interface équipement lors d'une mesure de lumière diffusée. L'interface équipement se décompose en quatre zones :

- la zone 1 regroupe les paramètres de mesure ;
- la zone 2 récapitule les principaux résultats de la mesure ;
- la zone 3 présente les résultats de la mesure pour chacun des détecteurs, le large à gauche et l'étroit à droite. La partie supérieure correspond à une cartographie de l'intensité de lumière diffusée. Cette cartographie de l'intensité de lumière diffusée est codée en couleurs. La partie inférieure de la zone 3 est un histogramme représentant la distribution en pourcentage (ordonnée) des différents niveaux d'intensité de lumière diffusée (abscisse) ;

- la zone 4 expose le code couleur utilisé dans la zone 3 ainsi que le pourcentage de surface de la plaque générant des niveaux d'intensité de lumière diffusée représentés par une même couleur.

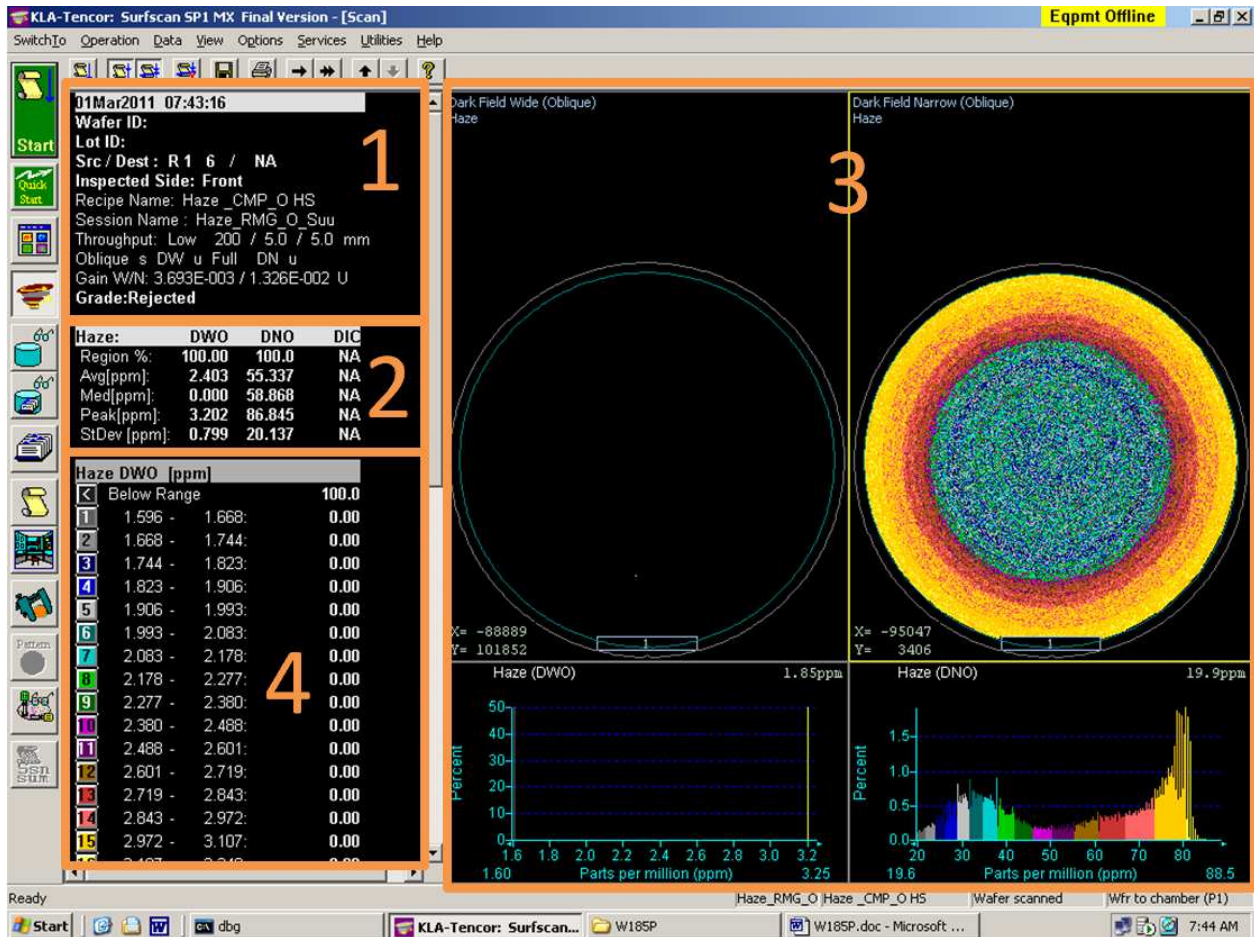


Figure 4-11 : Capture d'écran de l'interface équipement lors d'une mesure de lumière diffusée effectuée sur un Surfscan SP1 DLS (Dual Light Scattering) de marque KLA Tencor.

La cartographie (partie 3) est constituée de pixels de 500 μm par 500 μm . Le niveau de lumière diffusée et donc la couleur d'un pixel est obtenu à partir de la moyenne des intensités de lumière diffusée mesurées dans cette zone de 500 μm par 500 μm . Le nombre de couleurs utilisées pour cartographier l'intensité de lumière diffusée par la plaque est limité à 16. L'histogramme (partie 3) présente une discrétisation de l'intensité de lumière diffusée plus fine que le code couleur (partie 4). En effet, il apparaît sur l'histogramme, pour une même couleur

(ensemble d'intensités de lumière diffusée), différents pourcentages d'intensité de lumière diffusée

Les valeurs suivantes sont utilisées :

- l'intensité de lumière diffusée localement par une zone de 500 μm par 500 μm . Elle correspond à la valeur d'un pixel de la cartographie ;
- l'intensité de lumière diffusée moyenne. Elle est égale à la moyenne pondérée de toutes les intensités de lumière diffusée mesurées dans la zone considérée ;
- l'intensité de lumière diffusée la plus présente dans la zone considérée (ici la plaque). Elle correspond à l'intensité de lumière diffusée dont le pourcentage est le plus élevé sur l'histogramme de la partie 3.

Les mesures sont effectuées en incidence oblique (72° par rapport à la normale à la surface) et avec le collecteur large (couvrant des angles de diffusion allant de 25° à 70° par rapport à la normale à la surface). Cette combinaison de paramètres permet de récolter la lumière diffusée générée par des structures présentant une gamme de fréquences spatiales la plus large possible (Figure 4-12).

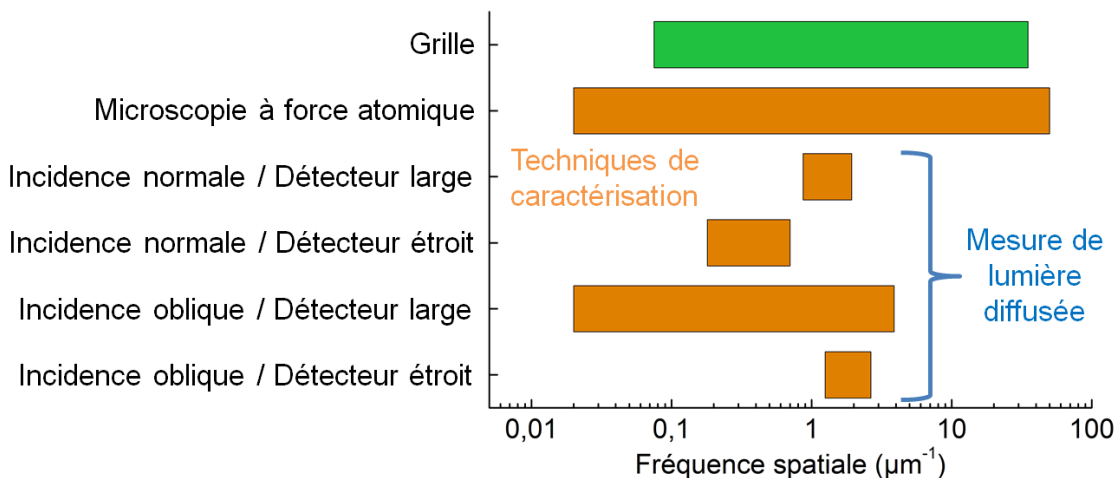


Figure 4-12 : Domaines de fréquences spatiales des configurations de mesure de lumière diffusée et des grilles présentes sur la surface.

En effet, du fait de la longueur d'onde utilisée et des dimensions des motifs présents sur la surface, l'hypothèse selon laquelle la lumière diffusée subit le phénomène de diffraction est justifiée. Les formules de diffraction de la lumière par un réseau sont utilisées pour calculer les bornes des différentes gammes de fréquences. La configuration choisie offre une zone de recouvrement importante avec la gamme de fréquences spatiales des grilles présentes sur la surface. Les bornes des gammes de fréquences spatiales des grilles sont calculées à partir des règles de dessin des différents masques utilisés. Les largeurs minimales et maximales des structures ainsi que les densités de structures minimales et maximales permettent d'extraire la gamme d'espacements possibles entre les structures. On en déduit la gamme de fréquences spatiales des motifs. Ainsi, une zone dans laquelle la largeur des grilles est égale à un micromètre et la densité des grilles est égale à 50% présente un espacement entre les grilles de un micromètre. Dans ce cas la fréquence spatiale des grilles est égale à un μm^{-1} .

Le mode haute sensibilité est activé (espacement du tracé en spirale du laser égal à 25 micromètres) afin de balayer le plus de surface possible. Dans ces conditions le faisceau de mesure est elliptique et sa taille est égale à 25 micromètres par 58 micromètres. Comme indiqué plus haut, l'intensité de lumière diffusée et donc la couleur du pixel correspond à la moyenne des intensités de lumière diffusée générés par cette zone.

Les barres d'erreur représentent l'incertitude de mesure pour un intervalle de confiance de 95,4%. Lorsqu'elles ne sont pas visibles, les barres d'erreur sont confondues avec les points de mesure. Elles représentent l'erreur de fidélité de la mesure.

III. Résultats et discussion

L'objectif de cette partie est d'évaluer les capacités de la mesure de lumière diffusée pour le contrôle de la topographie d'une puce induite par le procédé de polissage mécano-chimique. En accord avec l'objectif de la thèse, le procédé métrologique doit être sensible à des variations de topographie nanométriques sur distances centimétriques.

3.1 Choix d'un ensemble de paramètres de mesure

Cette étude débute par le choix d'un ensemble de paramètres de mesure adapté aux différentes plaques utilisées. Les équipements de mesure de lumière diffusée sont principalement destinés à des mesures de détection particulière sur des surfaces homogènes et non structurées, par conséquent les ensembles de paramètres de mesure disponibles ne sont pas utilisables. Les niveaux de détection doivent être ajustés de manière à acquérir la totalité de la lumière diffusée. Si la limite basse est fixée à 100 parties par million et la limite haute est fixée à 500 parties par million alors la mesure d'une plaque générant des intensités de lumière diffusée inférieures à 100 parties par million ne fournit aucune information. Le niveau de détection supérieur doit être choisi afin de ne pas saturer le détecteur. L'ensemble des paramètres de mesure doit être adapté à toutes les étapes du procédé. Dans le cas d'un polissage mécano-chimique, il doit remplir les conditions détaillées ci-dessus pour des mesures avant polissage mécano-chimique et après chacune des étapes du procédé. Le même ensemble de paramètres de mesure est utilisé pour toutes les mesures présentées dans ce chapitre.

3.2 Etude de la sensibilité de la mesure de lumière diffusée à la densité de structures

Nous allons dans un premier temps rapporter les résultats obtenus sur la plaque 1 avant polissage. La Figure 4-13 montre la cartographie et l'histogramme de l'intensité de lumière diffusée.

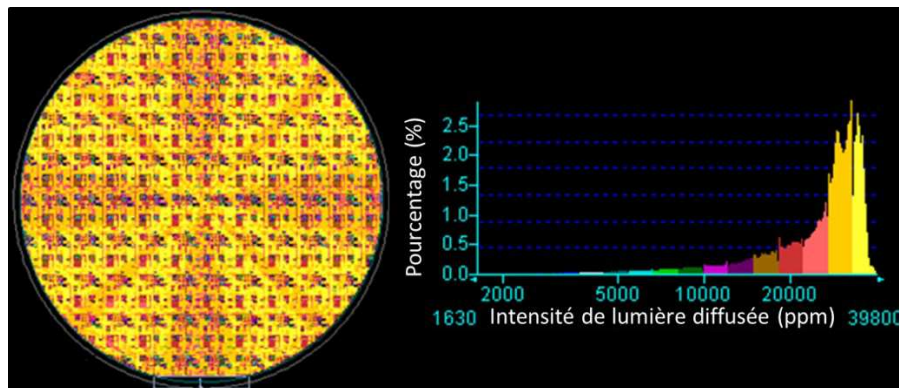


Figure 4-13 : Cartographie et histogramme de l'intensité de lumière diffusée par la plaque 1 avant polissage POC.

La répétition d'un motif est observée. La Figure 4-14 illustre l'intensité de lumière diffusée par un de ces motifs ainsi qu'une extraction de la densité de motifs⁵⁴.

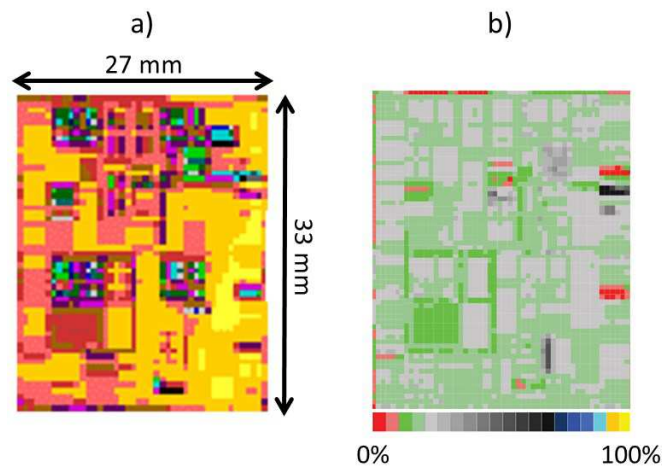


Figure 4-14 : a) Cartographie de l'intensité de lumière diffusée ; b) extraction de la densité de motifs.

Il apparaît que les motifs visibles sur la Figure 4-13 correspondent aux puces présentes sur la plaque. La taille d'un pixel d'une image de lumière diffusée est de 500 μm par 500 μm de ce fait, nous avons calculé la densité de motifs sur des zones équivalentes. La Figure 4-14 montre une corrélation partielle entre la densité de motifs et l'intensité de la lumière diffusée. Cette corrélation est imparfaite car la valeur affichée par un pixel est une moyenne. Aujourd'hui, les nœuds technologiques 65 nm, 45 nm, 28 nm et 20 nm impliquent des tailles de motifs bien inférieures à la taille du pixel.

En conclusion, la cartographie de l'intensité de lumière diffusée semble présenter une sensibilité importante à l'état de surface de la plaque. Cette sensibilité semble suffisante pour une utilisation à l'échelle du circuit intégré.

Les performances du polissage mécano-chimique sont dépendantes de la densité de motifs présents sur la surface, il est donc important de savoir si l'intensité de lumière diffusée est aussi

⁵⁴ Une extraction de la densité de motifs permet d'illustrer, à l'aide d'un code couleur, la densité de motifs présents dans une zone représentée par un pixel. La taille de la zone peut être choisie. Ce type de donnée est généré à partir du fichier informatique du dessin du circuit intégré.

dépendante de ce paramètre. Afin de vérifier l'hypothèse de la dépendance de l'intensité de lumière diffusée en fonction de la densité de structures, la mesure est réitérée sur la plaque 2, générée à partir d'un masque de technologie 65 nm. Cette plaque non polie est élaborée dans les mêmes conditions que les autres plaques utilisées durant cette étude (mêmes matériaux, mêmes épaisseurs, même intégration). Ce nouveau masque est choisi car il présente des zones de densités fixes (18%, 33%, 45%, 62,5% et 90%) suffisamment grandes pour être cartographiées par un ou plusieurs pixels (c.à.d. des zones supérieures à 500 μm par 500 μm). Une couche de 30 nm de tantale est déposée sur toute la surface de la plaque afin d'observer l'évolution de l'intensité de lumière diffusée en fonction, uniquement, de la densité de structures. En l'absence de la couche de tantale, l'analyse de la corrélation entre l'intensité de la lumière diffusée et la densité de structures serait difficile à cause de nombreux phénomènes de réflexion, diffusion, diffraction parasites illustrés sur la Figure 4-15.

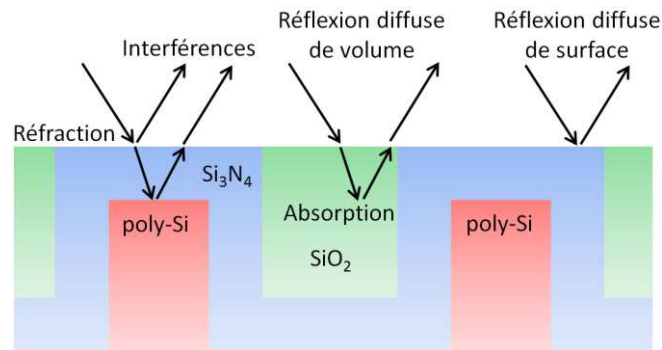


Figure 4-15 : Illustration sur la plaque après polissage avec arrêt sur nitrure de silicium et sans dépôt de tantale du parcours des rayons lumineux soumis à la réflexion diffuse de surface, réflexion diffuse de volume, réfraction, absorption et transmission des différentes couches.

La couche idéale devrait :

- être conforme à la topographie sous-jacente ;
- être opaque à la longueur d'onde du laser utilisé ;
- avoir une faible rugosité.

Nous avons opté pour le dépôt⁵⁵ d'une couche de tantale de 30 nm d'épaisseur. La réflectivité calculée d'une telle couche déposée sur un substrat de silicium, pour un angle d'incidence de

⁵⁵ Dépôt physique en phase vapeur à température ambiante.

72° et une polarisation p , est égale à 0,46. Après avoir traversée 60 nm de tantale la totalité de la lumière transmise est absorbée. La valeur, mesurée par AFM, de l'écart type de la rugosité de la couche est égale à 0,9 nm.

La Figure 4-16 illustre l'évolution de l'intensité de lumière diffusée en fonction de la densité de motifs pour quatre puces réparties le long d'un rayon de la plaque.

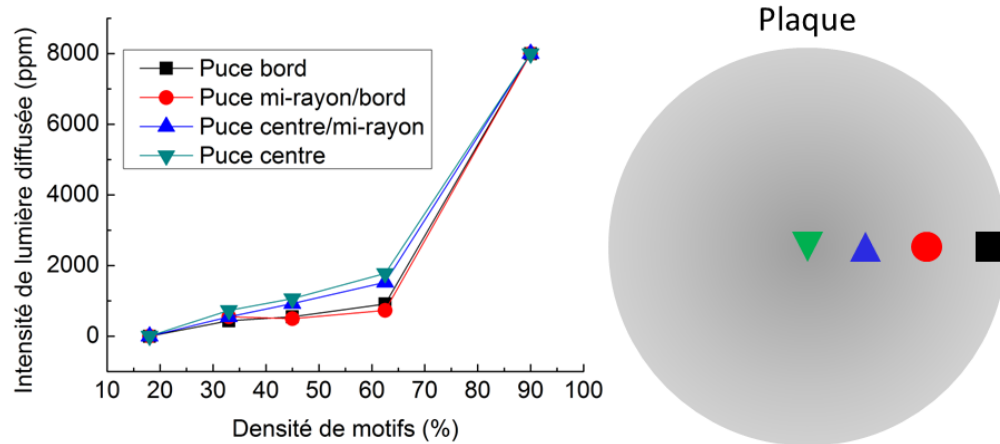


Figure 4-16 : Evolution de l'intensité de lumière diffusée en fonction de la densité de motifs dans le cas d'une plaque non polie et recouverte d'une couche de 30 nm de tantale.

La Figure 4-16 montre que l'intensité de la lumière diffusée ne dépend pas de la position du motif sur la plaque. Pour des densités de motifs inférieures à 62,5% l'intensité de la lumière diffusée augmente légèrement et linéairement avec l'augmentation de la densité de motifs. L'augmentation d'intensité de lumière diffusée est plus importante pour des densités de structures supérieures à 62,5%. Les faibles valeurs de l'intensité de lumière diffusée observées pour les densités de motifs inférieures à 62,5%, sont sans doute dues à des pertes d'intensité de lumière provenant des réflexions multiples comme illustré sur la Figure 4-17-a. En effet, après quelques réflexions la lumière est totalement absorbée ($R_{\text{tantale}} = 0,46$). Oren et Nayar (Oren and Nayar 1994) supposent, dans leur modèle, que l'absorption est totale après seulement deux réflexions. En revanche, pour une densité de motifs importante la surface peut être considérée

comme plane et n'est plus sujette au phénomène de réflexions multiples comme illustré par la Figure 4-17-b⁵⁶.

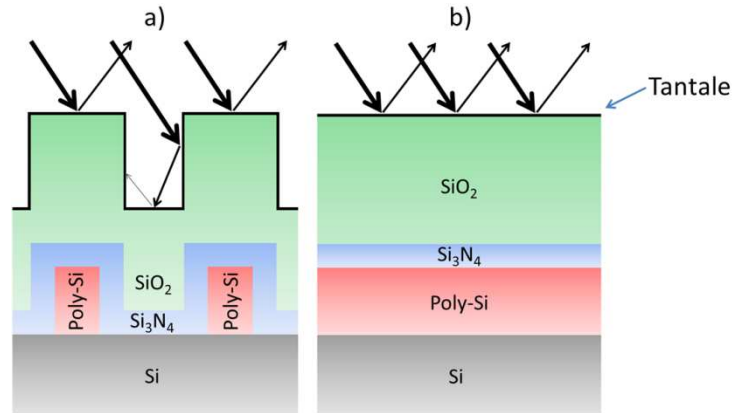


Figure 4-17 : Illustration du phénomène de réflexions multiples en présence du dépôt de 30 nm de tantale pour a) une densité de structures de 50% et b) une densité de structures de 100%.

La densité de motifs du masque utilisé pour la fabrication des plaques caractérisées durant cette étude est comprise entre 0% et 67%. Dans cette gamme de valeurs la Figure 4-16 indique que l'intensité de lumière diffusée est proportionnelle à la densité de motifs. Ce résultat est confirmé par la Figure 4-18 qui montre une très bonne corrélation entre la distribution d'intensité de lumière diffusée d'une plaque non polie et la distribution de densité de motifs.

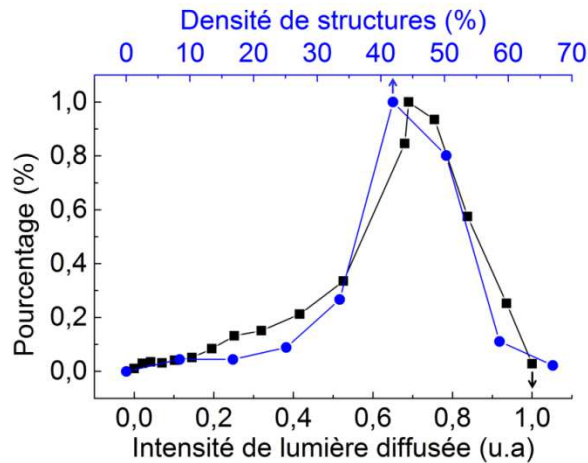


Figure 4-18 : Comparaison de la distribution d'intensité de lumière diffusée et de la distribution de densité de motifs pour une même plaque avant polissage (plaque 1).

⁵⁶ Etant donné la taille des motifs, nous avons conscience de la limitation de cette interprétation qui se place dans un contexte d'optique purement géométrique.

La distribution d'intensité de lumière diffusée correspond à l'histogramme affiché après la mesure d'une plaque. La distribution de densité de motifs est calculée à partir de la cartographie de densité de structures présentée Figure 4-14. Ce résultat implique qu'en absence de variations autres que la densité de structures, chaque niveau de lumière diffusée représenté dans l'histogramme correspond à un niveau de densité de motifs. Le pic d'intensité de lumière diffusée équivaut donc à l'intensité de lumière diffusée par la densité de motifs la plus présente sur la surface.

Une conclusion importante est que la mesure de lumière diffusée présente une forte sensibilité à la densité de structures présentes sur la surface.

3.3 Etude de la sensibilité de la mesure de lumière diffusée à la non-uniformité de polissage à l'échelle de la plaque

Des mesures sont effectuées sur trois plaques ayant subi la première étape de polissage du procédé *Poly Open CMP* (plaque 3, 4 et 5). Il s'agit de l'étape avec arrêt sur nitrure de silicium (sur la surface supérieure des grilles). Une chimie de polissage sélective au nitrure de silicium est utilisée. Les trois surfaces analysées ont subi des temps de polissage différents.

Les cartographies de l'intensité de lumière diffusée de certaines de ces plaques présentent deux zones (Figure 4-19-b) : une zone centrale A et une zone périphérique B. Nous nous intéresserons à la signature visible sur les cartographies de l'intensité de lumière diffusée à la fin de ce chapitre.

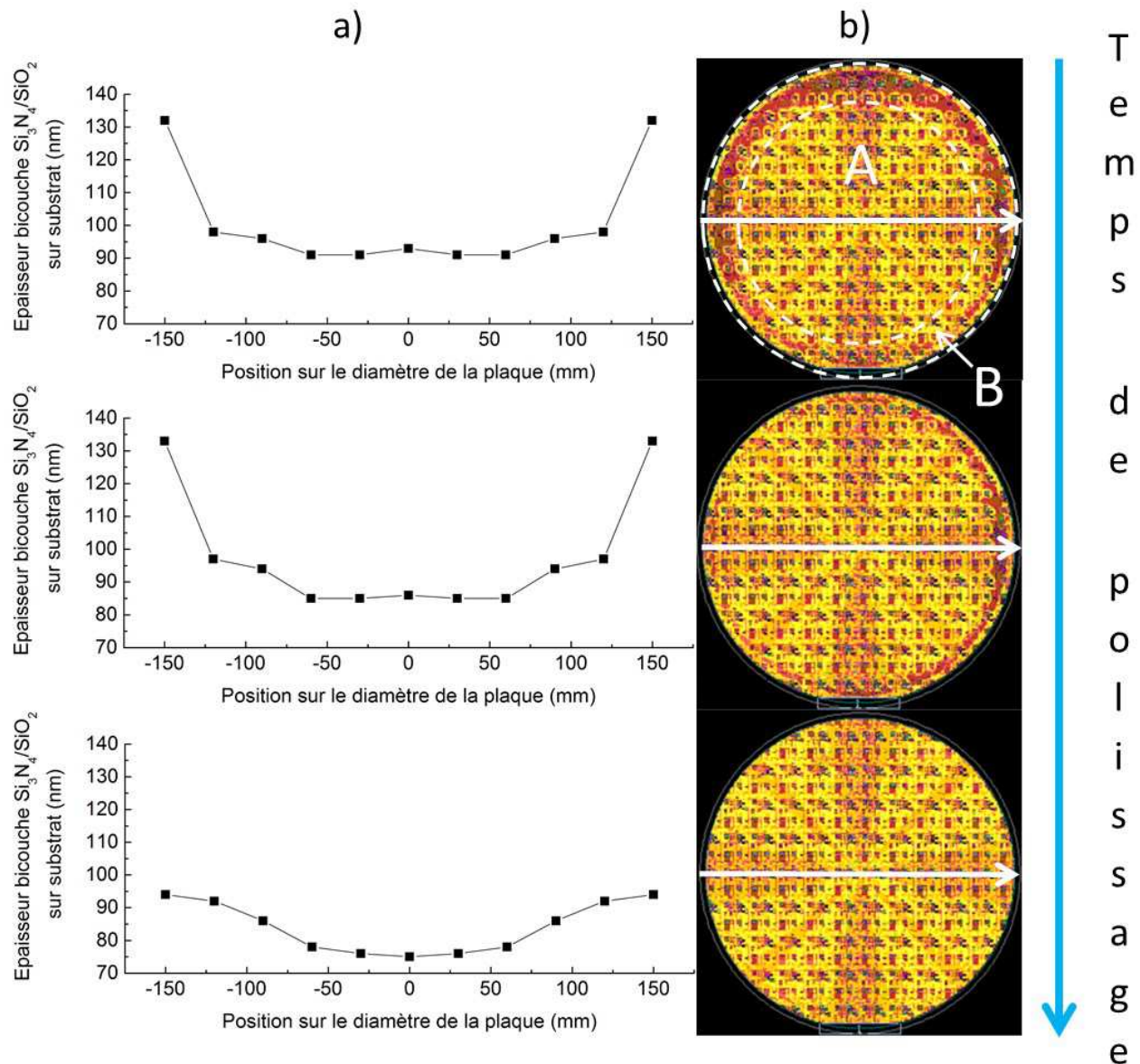


Figure 4-19 : a) Profils d'épaisseurs de la bicouche $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ sur substrat de silicium mesurées par ellipsométrie dans les boîtes de mesure^{57,58} ; b) cartographies de l'intensité de lumière diffusée en fonction du temps de polissage. Il s'agit de trois plaques après étape arrêt sur Si_3N_4 du procédé CMP POC. Les plaques sont polies avec une chimie sélective au Si_3N_4 (plaque 3, 4 et 5).

La zone périphérique disparaît avec l'augmentation du temps de polissage ou sur-polissage. Le sur-polissage est une pratique courante en CMP. Il permet de compenser la non-uniformité du

⁵⁷ Comme détaillé dans les chapitres 1 et 3, les boîtes de mesure sont des structures dédiées aux différentes mesures qui ont lieu durant la fabrication du circuit intégré. Elles sont placées entre les puces, dans les chemins de découpe, et mesurent 100 μm par 50 μm .

⁵⁸ Il existe également des boîtes de mesure composées d'une tricouche $\text{SiN}/\text{SiO}_2/\text{poly-Si}$.

dépôt et du polissage et ainsi de s'assurer de l'absence, sur toute la plaque, de résidus, du matériau que l'on souhaite retirer (voir Figure 4-20). Il s'agit d'un temps de polissage supplémentaire qui débute après la détection de fin de polissage (Chapitre 1, section 2.1). Comme illustré, le sur-polissage augmente les épaisseurs des couches retirées lors du polissage.

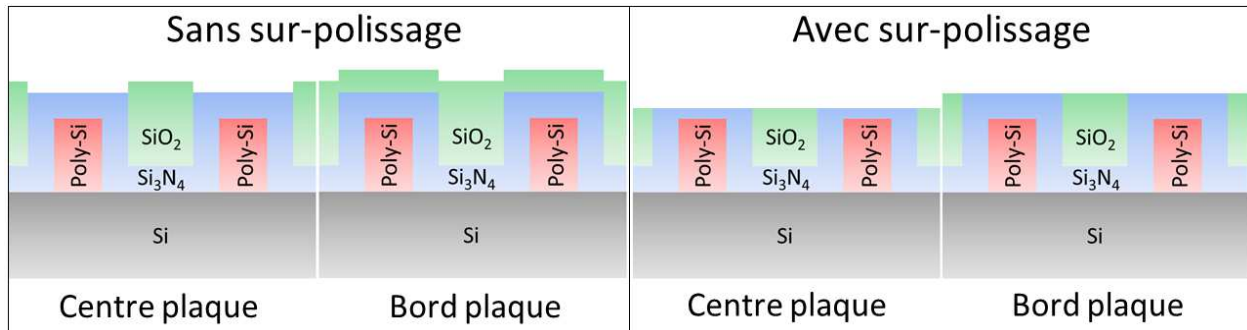


Figure 4-20 : Illustration du rôle du sur-polissage dans le cas des plaques après étape arrêt sur Si_3N_4 du procédé CMP POC.

La cartographie de l'intensité de lumière diffusée semble sensible à la non-uniformité de polissage à l'échelle de la plaque. Ce type de caractérisation est habituellement réalisé à l'aide de mesures d'épaisseur effectuées par ellipsométrie dans des boîtes de mesure. Ces mesures, pour un diamètre de la plaque, sont reportées sur la Figure 4-19-a. Il apparaît que l'intensité de lumière diffusée est inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'empilement des couches. De plus, la Figure 4-19 montre que l'augmentation du temps de polissage diminue la non-uniformité d'intensité de lumière diffusée et d'épaisseur. La présence de résidus est également observée par microscopie optique sur le bord des deux plaques présentant les temps de polissage les plus faibles (Figure 4-21).

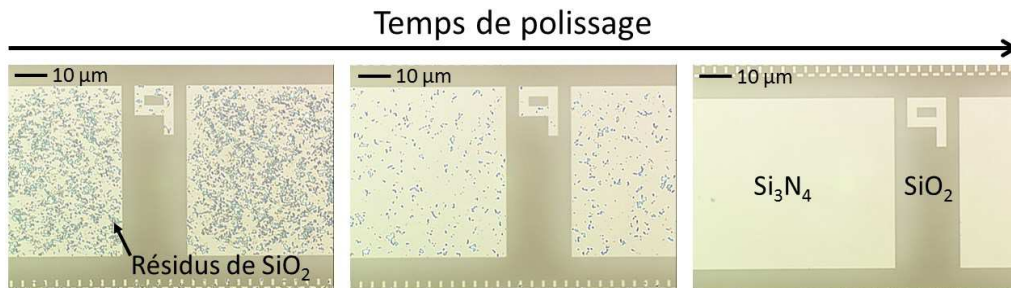


Figure 4-21 : Observation par microscopie optique de la présence de résidus de dioxyde de silicium, sur nitrure de silicium, en fonction du temps de polissage après étape arrêt sur Si_3N_4 du procédé CMP POC. Les plaques sont polies avec une chimie sélective au Si_3N_4 (plaque 3, 4 et 5). Les observations ont été faites en bord de plaque.

La Figure 4-22 met en évidence la non-uniformité du polissage, celle-ci résulte en l'apparition de deux zones, notées A et B, possédant des intensités de lumière diffusée différentes. Par conséquent, deux distributions d'intensité de lumière diffusée devraient apparaître sur l'histogramme. Chacune d'elle correspondant à une des deux zones visibles sur la cartographie et traduisant comme montré précédemment une distribution de densité de motifs (voir Figure 4-18). Néanmoins, une seule distribution d'intensité de lumière diffusée est visible quelle que soit la plaque. Ceci est attribué à la faible non-uniformité de la plaque.

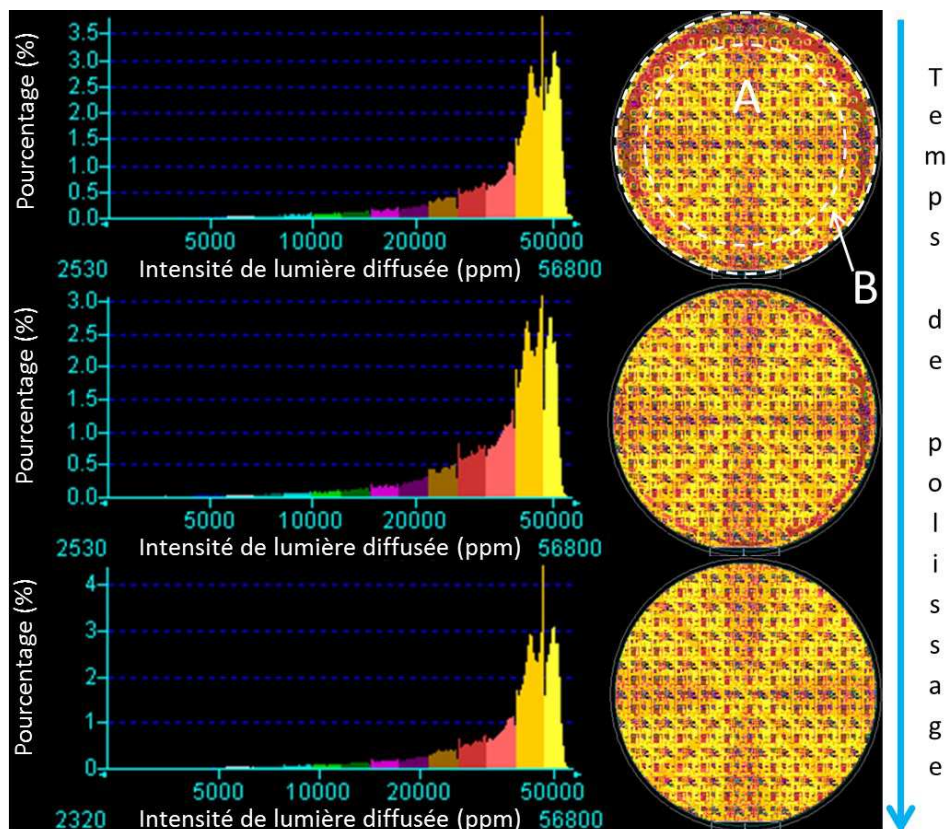


Figure 4-22 : Distributions et cartographies de l'intensité de lumière diffusée de trois plaques après polissage arrêt sur Si_3N_4 du procédé CMP POC. Les plaques sont polies avec une chimie sélective au Si_3N_4 (plaque 3, 4 et 5).

Trois plaques identiques ayant subi la même méthode de polissage que celle utilisée dans l'exemple précédent (plaque 5) sont fabriquées ; ces plaques présentent une très bonne uniformité de polissage.

Ces trois plaques subissent alors la seconde étape de polissage du procédé POC (section 2.1) avec pour objectif le retrait du nitrure de silicium sur la surface supérieure des grilles sacrificielles en silicium poly cristallin (plaque 6, 7 et 8). Une chimie de polissage sélective au dioxyde de silicium est utilisée ; le temps de polissage est différent pour chacune des trois plaques. La Figure 4-23 montre les cartographies de l'intensité de lumière diffusée et les histogrammes de ces plaques.

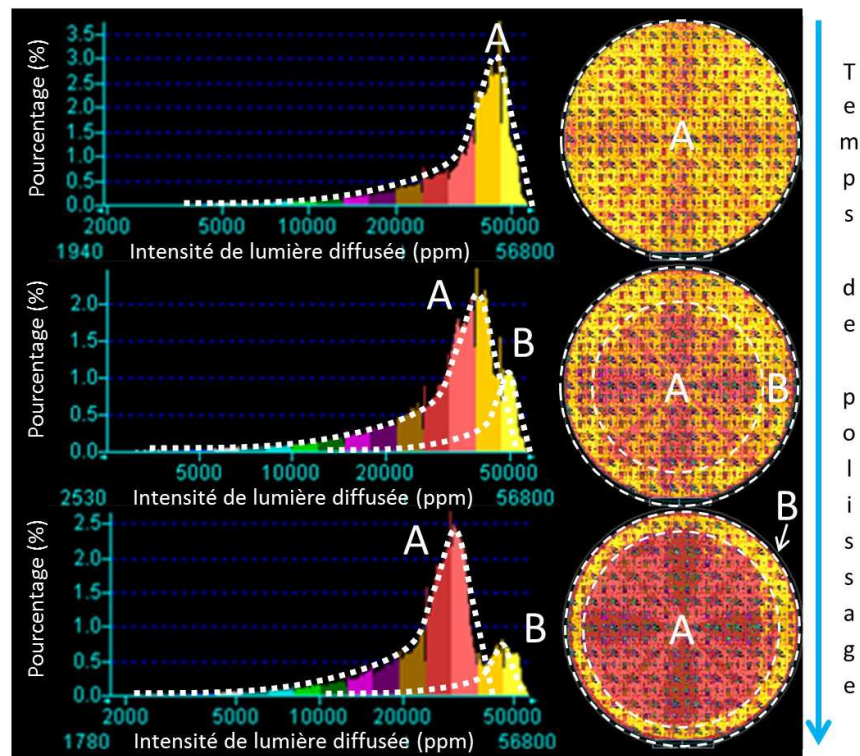


Figure 4-23 : Distributions et cartographies de l'intensité de lumière diffusée de trois plaques après polissage arrêt sur silicium poly-cristallin du procédé CMP POC. Les plaques sont polies avec une chimie sélective au SiO_2 (plaque 6, 7 et 8).

Les deux dernières cartographies présentes une non-uniformité de polissage à travers la plaque beaucoup plus importante que pour la première étape du procédé POC. Une meilleure uniformité ainsi qu'une seule distribution d'intensité de lumière diffusée sont observées pour la plaque la moins polie. Pour les deux autres plaques, la dégradation de l'uniformité conduit à l'apparition d'une seconde distribution d'intensité de lumière diffusée. Les différences entre les deux distributions fournissent deux informations différentes sur l'uniformité du polissage.

L'écart horizontal, Δ_h , séparant les deux distributions est significatif de l'amplitude de la non uniformité alors que l'écart vertical, Δ_v , traduit l'étendu de la non uniformité de polissage à l'échelle de la plaque (voir Figure 4-24).

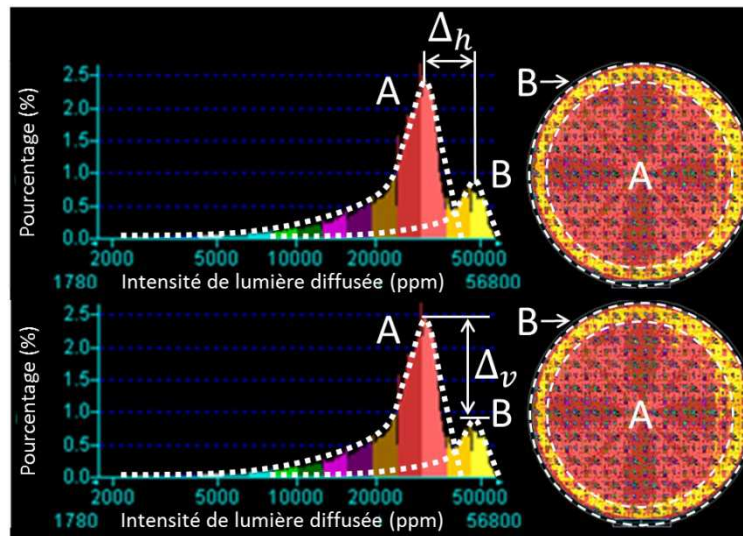


Figure 4-24 : Représentation de l'écart horizontal et de l'écart vertical entre les distributions d'intensité de lumière diffusée des zones A et B.

Le suivi du pic de la distribution permet, contrairement au suivi de l'intensité de lumière diffusée moyenne, de ne pas être affecté par la non-uniformité de polissage dans le cas où celle-ci ne s'étend pas sur plus de 50% de la surface de la plaque. Dans ce cas, les amplitudes des deux pics seraient égales. Il est important de préciser que les procédés de CMP utilisés en production n'atteignent jamais des valeurs aussi élevées de non-uniformité. Par conséquent la détection et le suivi des pics d'intensité de lumière diffusée offrent une nouvelle méthode de contrôle de la non-uniformité de polissage à l'échelle de la plaque. Celle-ci a l'avantage de mesurer, en trois minutes, la plaque entière et non un échantillonnage de celle-ci.

En conclusion, la cartographie de l'intensité de lumière diffusée fournit un moyen de contrôle de la non-uniformité de polissage.

3.4 Etude de la sensibilité de la mesure de lumière diffusée à la nano-topographie de la grille

Dans le paragraphe précédent nous nous sommes intéressés à l'analyse de l'intensité de la lumière diffusée pour un contrôle de l'uniformité de polissage à l'échelle de la plaque. Nous allons maintenant analyser l'influence de la nano-topographie des grilles des transistors sur l'intensité de la lumière diffusée. Pour ce faire, les évolutions de l'intensité moyenne de lumière diffusée et du pic d'intensité de lumière diffusée au cours des étapes du procédé de polissage POC sont étudiées⁵⁹. Comme cela a été évoqué au début de cette section, l'équipement ne permet pas d'extraire les analyses effectuées à l'échelle de la puce ou intra puce, de ce fait nous avons suivi les valeurs d'intensité de lumière diffusée à l'échelle de la plaque. Les valeurs de l'intensité moyenne de lumière diffusée et du pic d'intensité de lumière sont reportées Figure 4-25 pour la plaque non polie (plaque 1) et pour trois plaques après polissage avec arrêt sur nitrure de silicium (plaque 3, 4 et 5) ; les temps de polissage sont différents pour chacune des plaques polies et sont notés t1, t2 et t3.

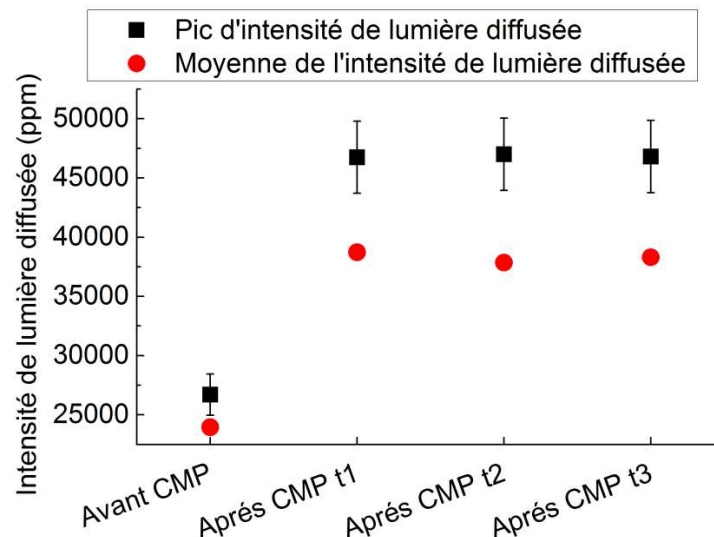


Figure 4-25 : Pic et moyenne de l'intensité de lumière diffusée d'une plaque avant polissage (plaque 1) et de trois plaques après polissage avec arrêt sur Si_3N_4 présentant trois temps de polissage (t1, t2 et t3) différents. Les plaques sont polies avec une chimie sélective au Si_3N_4 (plaque 3, 4 et 5).

⁵⁹ Les définitions de l'intensité moyenne de lumière diffusée et du pic d'intensité de lumière diffusée sont données dans la section 2.3. de ce chapitre.

La valeur élevée de l'incertitude de mesure du pic d'intensité de lumière diffusée provient de son extraction manuelle sur écran. La Figure 4-25 montre que le pic et la moyenne de l'intensité de la lumière diffusée augmentent après le polissage avec arrêt sur nitrure de silicium. Cette augmentation est supposée provenir de la diminution des phénomènes de réflexions multiples.

Les signaux sont ensuite constants quel que soit le temps de polissage. Comme il a été montré (section 3.3), la valeur du pic d'intensité de lumière diffusée n'est pas affectée par la non-uniformité de polissage. L'intensité moyenne de lumière diffusée quant à elle n'est pas non plus affectée en raison de la faible non-uniformité de polissage.

Le profil AFM⁶⁰ (voir Figure 4-26) montre que la topographie à l'échelle des grilles est plane et possède une rugosité d'écart type égale à 0,1 nm. Ces résultats sont indépendants du temps de polissage.

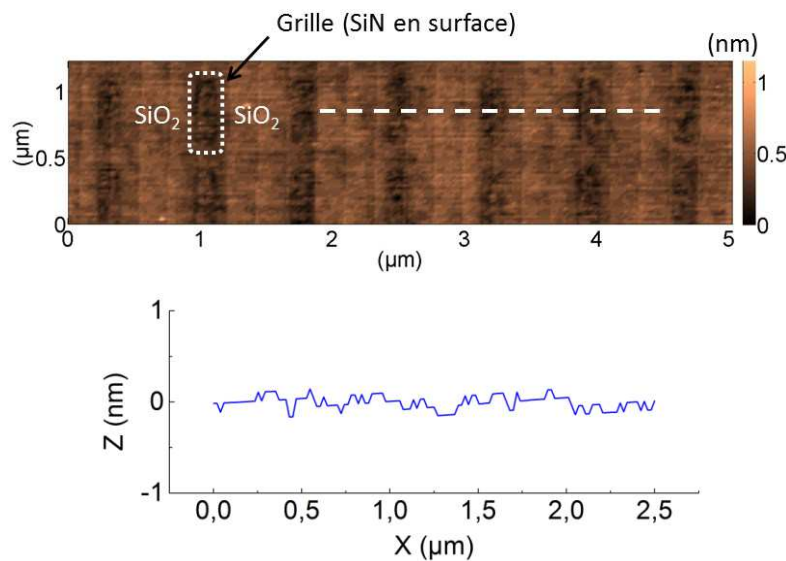


Figure 4-26 : Image obtenue par microscopie à force atomique et profil de la surface des grilles des trois plaques après polissage avec arrêt sur Si_3N_4 présentant trois temps de polissage différents. Les plaques sont polies avec une chimie sélective au Si_3N_4 (plaque 3, 4 et 5).

⁶⁰ Le microscope à force atomique utilisé est un Veeco Digital Instruments Dimension 3100 de l'équipementier BrukerTM. Ce dernier fonctionne en mode contact intermittent et mesure le changement d'amplitude d'oscillation du levier. Les images présentées durant ce travail de thèse présentent une résolution latérale de 10 nm et sont acquises à une fréquence de 0,5 Hz. Les pointes utilisées sont des pointes en silicium dopées phosphore de marque BrukerTM et de résistivité comprise entre 1 et 10 Ohm/cm. La longueur du levier est comprise entre 115 et 135 μm , sa largeur entre 30 et 40 μm , son épaisseur entre 3,5 et 4,5 μm , sa fréquence de résonance entre 242 et 348 kHz et sa constante de raideur entre 20 et 80 N/m.

La mesure de lumière diffusée semble être sensible aux variations nanométriques de topographie à l'échelle de la grille.

Les valeurs du pic d'intensité de lumière diffusée et de l'intensité moyenne de lumière diffusée pour les trois plaques après polissage avec arrêt sur silicium poly-cristallin, introduites Figure 4-23 et présentant trois temps de polissage différents, notés t1, t2 et t3, sont reportées en noire sur la Figure 4-27.

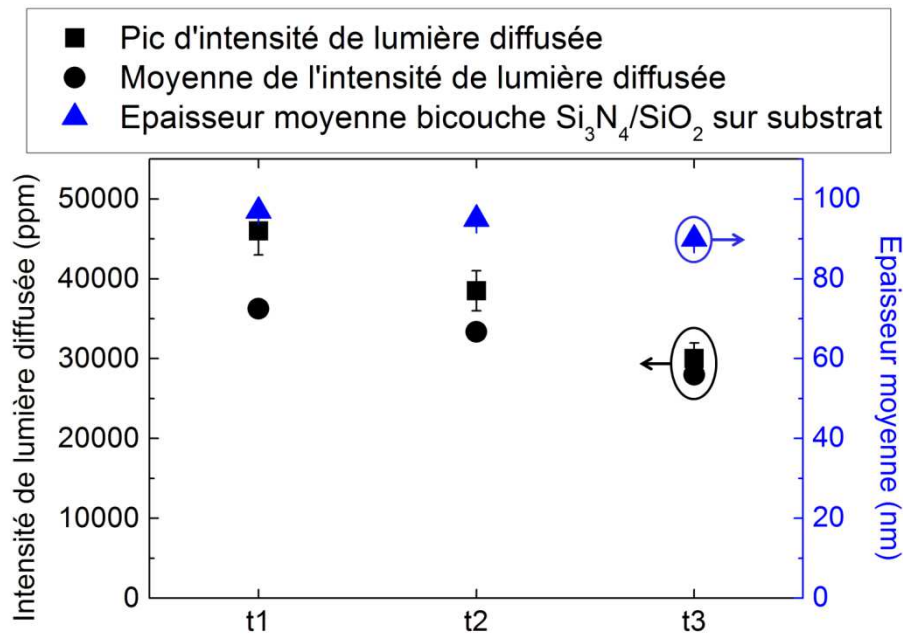


Figure 4-27 : Pic et moyenne de l'intensité de lumière diffusée et épaisseur moyenne de la bicouche $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ sur substrat de silicium de trois plaques après polissage avec arrêt sur silicium poly-cristallin. Trois temps de polissage (t1, t2 et t3) différents sont utilisés. Les plaques sont polies avec une chimie sélective au SiO_2 (plaque 6, 7 et 8).

La Figure 4-27 montre que le pic et la moyenne de l'intensité de la lumière diffusée décroissent avec l'augmentation du temps de polissage. Or, une observation par microscopie optique révèle une présence de résidus d'autant plus faible que le temps de polissage est important. Ainsi, la dépendance de l'intensité de lumière diffusée en fonction du temps de polissage pourrait être exploitée pour effectuer des contrôles rapides de présence de résidus. Actuellement le seul

moyen de contrôle disponible est long et destructif⁶¹. La mesure de l'intensité du pic de lumière diffusée constitue une alternative innovante. Cette technique, rapide (trois minutes par plaque), nécessite toutefois une calibration pour déterminer l'intensité de lumière diffusée « critique ».

L'épaisseur moyenne de la bicouche $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ sur substrat de silicium est mesurée par ellipsométrie dans des boîtes de mesure ; les valeurs des épaisseurs sont reportées sur la Figure 4-27. Une bonne corrélation avec l'intensité moyenne de lumière diffusée est observée.

Les valeurs du pic d'intensité de lumière diffusée et de l'intensité moyenne de lumière diffusée de ces plaques (6, 7 et 8), polies avec une chimie de polissage sélective au dioxyde de silicium, sont comparées avec des valeurs obtenues à partir de plaques identiques mais utilisant une chimie de polissage non sélective (plaque 9, 10 et 11). Cette différence de sélectivité conduit à des vitesses d'enlèvement différentes pour chacun des matériaux. Ceci induit des topographies différentes (Figure 4-28).

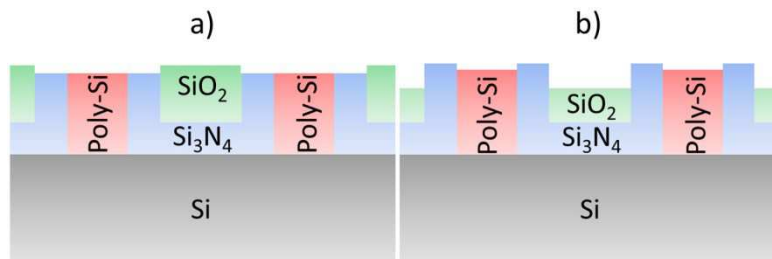


Figure 4-28 : Exemple de topographies différentes induites par des sélectivités différentes pour a) une chimie sélective au dioxyde de silicium ; b) une chimie non sélective.

La moyenne et le pic d'intensité de lumière diffusée de ces plaques sont reportés sur la Figure 4-29. Une bonne corrélation entre le niveau moyen de lumière diffusée et l'épaisseur moyenne est encore observée. La valeur du pic d'intensité de lumière diffusée est toujours dépendante du temps de polissage. De plus, il apparaît que les valeurs suivies dépendent également de la chimie de polissage. Ceci est attribué aux différentes topographies induites par le procédé de

⁶¹ Ce contrôle consiste à graver chimiquement les grilles sacrificielles. Des mesures d'AFM et de profilométrie mécanique sont ensuite effectuées pour vérifier le retrait des grilles sacrificielles. Si l'on observe qu'une grille est toujours présente cela indique que des résidus de SiN sont présents en trop grande quantité sur la surface de cette grille.

polissage mécano-chimique. Les mesures (Figure 4-30 et Figure 4-31) obtenues par microscopie à force atomique le confirment.

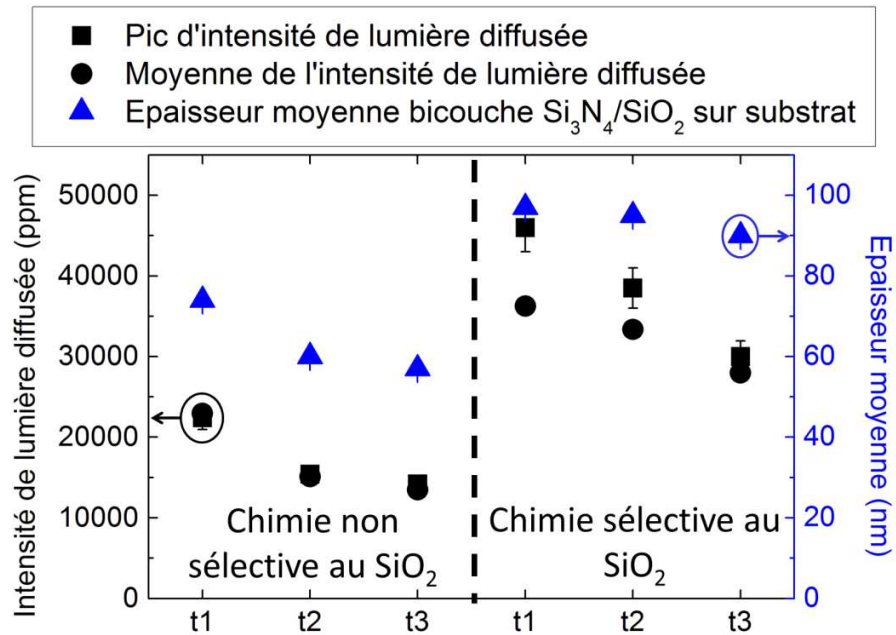


Figure 4-29 : Pic et moyenne de l'intensité de lumière diffusée et épaisseur moyenne de la bicouche $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ sur substrat de silicium de six plaques après polissage avec arrêt sur silicium poly-cristallin, polies avec deux chimies différentes. Trois temps de polissage (t_1 , t_2 et t_3) différents sont utilisés par famille de chimie (plaque 6 à 11).

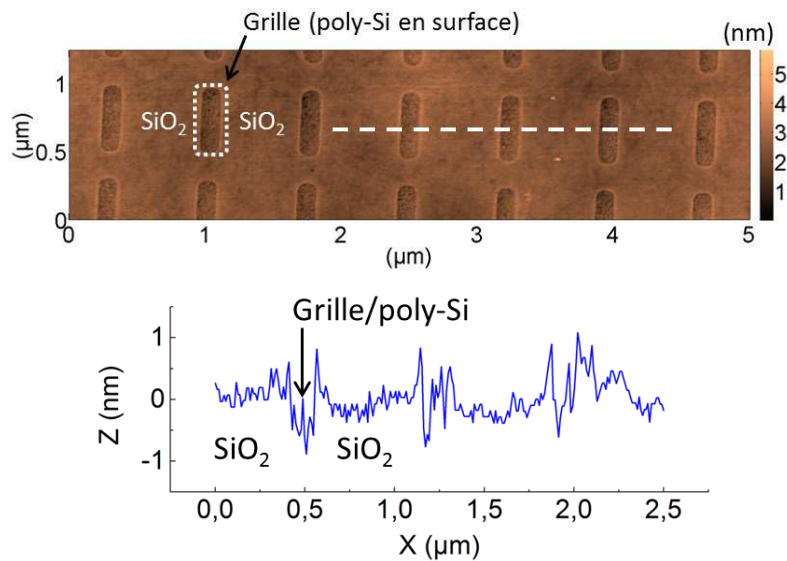


Figure 4-30 : Image obtenue par microscopie à force atomique et profil de la surface des grilles des trois plaques après polissage avec arrêt sur silicium poly-cristallin du procédé CMP POC. Une chimie sélective au SiO_2 est utilisée (plaque 6, 7 et 8).

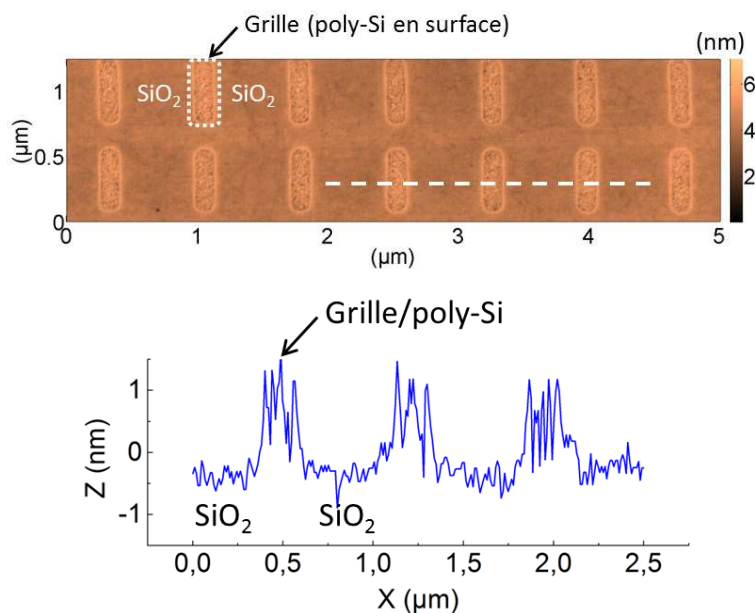


Figure 4-31 : Image obtenue par microscopie à force atomique et profil de la surface des grilles des trois plaques après polissage avec arrêt sur silicium poly-cristallin du procédé CMP POC. Une chimie non sélective est utilisée (plaque 9, 10 et 11).

Pour conclure, la lumière diffusée est dépendante de l'épaisseur, elle est également sensible aux variations nanométriques de la topographie de la grille. Les comportements de la lumière diffusée mis en évidence au cours de cette section ont été observés pour plusieurs types de plaque – épaisseurs différentes, dimensions différentes – et différents procédés de polissage mécano-chimique.

3.5 Etude de la mesure de lumière diffusée par simulation

Jusqu'à présent notre approche a été purement expérimentale, elle a consisté à établir des corrélations entre l'intensité de lumière diffusée et la densité de motifs et la topographie induite par les procédés de CMP. Nous allons maintenant tenter de simuler les tendances des résultats obtenus en utilisant le logiciel de simulation MIST⁶² (Germer 2008). Ce logiciel s'appuie sur la librairie SCATMECH (Germer 2008). Les possibilités offertes par le programme MIST sont décrites dans la référence (Germer 2008). Le MIST permet l'intégration de la fonction de

⁶² MIST pour Modeled Integrated Scattering Tool. Ce programme a été développé par le NIST pour *National Institute of Standards and Technology*.

distribution de la réflectance bidirectionnelle sur des angles solides spécifiés par l'utilisateur. Il est également possible d'observer l'influence de différents paramètres sur ces intégrales.

En particulier, les mesures effectuées après polissage avec arrêt sur nitrure de silicium montrent que l'intensité moyenne de lumière diffusée qui est égale à $26\,000 \text{ ppm} \pm 390 \text{ ppm}$ avant polissage subit une augmentation de 80% après polissage. Ceci implique qu'une surface avec topographie ou rugueuse génère moins de lumière diffuse qu'une surface pratiquement sans topographie ou moins rugueuse. Ce résultat montre que l'origine de la lumière diffusée sur des plaques polies et structurées reste inconnue : est-elle due à un mécanisme majoritaire de diffusion par la rugosité, à un phénomène de diffraction par les motifs périodiques ou aux deux ? Pour tenter de répondre à cette question, nous n'avons considéré que la lumière diffractée par un réseau de lignes en utilisant la méthode classique RCWA (Moharam and Gaylord 1981).

Les paramètres du modèle MIST sont choisis de manière à reproduire les conditions expérimentales (voir section 2.1). Les valeurs simulées représentent l'intensité de la lumière diffusée intégrée sur un angle solide égal à 0,001 stéradian.

Parmi les structures proposées par le logiciel MIST le réseau de lignes simples est le plus adapté. La Figure 4-32 montre les huit paramètres du modèle à renseigner.

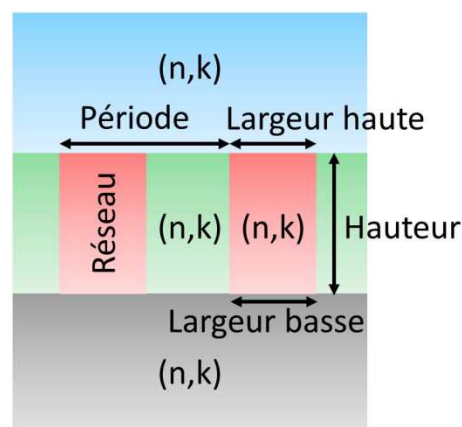


Figure 4-32 : Modèle « réseau de lignes simples ».

Ce modèle ne permet pas de décrire les structures réelles. Il faut donc procéder à des approximations illustrées sur la Figure 4-33 :

	Structures réelles	Structures simulées
Avant CMP	<p>SiO₂ = 150 nm Grille = 100 nm Poly-Si Si₃N₄ = 17 nm Si 45 nm</p>	<p>Poly-Si SiO₂ Si</p>
Après CMP	<p>Poly-Si SiO₂ Si₃N₄ Si</p>	<p>Poly-Si SiO₂ Si</p>

Figure 4-33 : Illustration des simplifications effectuées.

- la couche de nitrure de silicium enrobant le silicium poly-cristallin est négligée car elle est fine (17 nm), transparente et uniforme ;
- la surface avant polissage est considérée comme plane car il y a très peu de structures sur la surface⁶³. De plus, ces dernières sont constituées d'un matériau transparent, le SiO₂.

La simulation montre une augmentation de 71% de l'intensité de lumière diffusée après polissage ce qui correspond bien aux données expérimentales (80%). Ceci conforte notre hypothèse de départ concernant le rôle prépondérant du phénomène de diffraction.

⁶³ En effet, la cartographie de la densité de motifs montre que 94% de la surface présente une densité de motifs comprise entre 13% et 23%.

Le rôle joué par la diffraction est clairement démontré par les résultats suivants. Une série de mesures a été effectuée sur six structures possédant six hauteurs différentes variant de 50 nm à 650 nm. L'intensité de la lumière diffusée expérimentalement a été intégrée sur la totalité de la plaque. La Figure 4-34-a montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux issus de la simulation. On observe une variation périodique, de période égale à la longueur d'onde⁶⁴, qui est reproduite par les points expérimentaux. L'écart entre les résultats expérimentaux et simulés est dû au fait qu'en réalité les motifs sont constitués de plusieurs familles de réseaux de lignes parallèles et perpendiculaires (voir Figure 4-34-b).

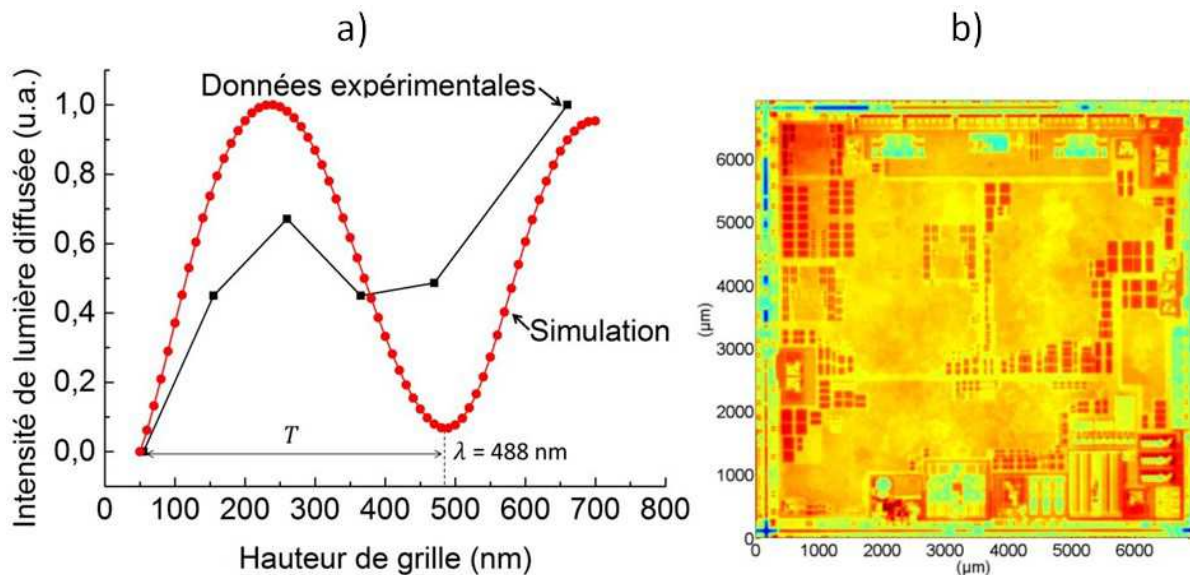


Figure 4-34 : a) Intensité de lumière diffusée en fonction de la hauteur des structures, comparaison entre données expérimentales et simulation ; b) exemple de la géométrie réelle des structures présentes sur la surface. Vue de dessus obtenue par microscopie interférométrique.

Maintenant que le rôle de la diffraction est clairement établi, nous allons montrer comment la diffraction permet d'expliquer la présence de signatures (croix observées entre autres sur la Figure 4-19 et la Figure 4-23) dont il a été fait état dans la section 3.3. L'impact de cette signature, faible, dans les mesures présentées au cours de ce chapitre, peut être important et

⁶⁴ En effet, le déphasage est égal à : $\varphi = \frac{2\pi n}{\lambda} \delta(h) \cos \theta$, où n est l'indice optique du milieu ambiant, λ est la longueur d'onde du faisceau incident, θ est l'angle formé par le faisceau incident et la normale à la surface et $\delta(h)$ est la différence de chemin optique. Ces notions sont largement abordées dans le chapitre 2 section 1.

rendre inexploitable les données comme dans les exemples présentés Figure 4-35. Il est donc important de comprendre l'origine de cette signature. Pour ce faire nous avons procédé, sans succès, à une étude expérimentale en faisant varier les paramètres de mesure (polarisation, choix du détecteur, angle d'incidence, ...). Comme cette signature n'est pas observée sur des plaques non structurées elle pourrait être due à la présence d'une surface structurée.

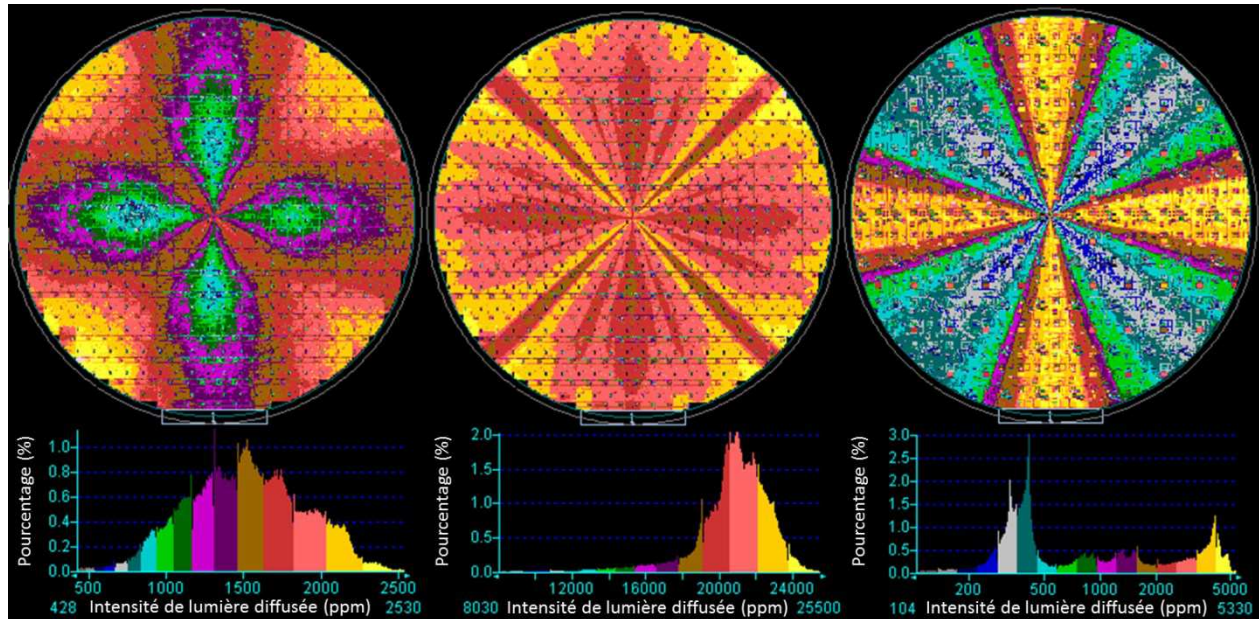


Figure 4-35 : Exemple de signatures rendant la mesure inexploitable, chaque plaque présente un masque différent mais la même intégration décrite Figure 4-10, les trois plaques ont subi l'étape de polissage avec arrêt sur Si_3N_4 .

Afin de vérifier cette hypothèse plusieurs plaques identiques - mêmes matériaux, mêmes épaisseur, même intégration, même nœud technologique - ont été générées à partir de masques différents. Il a été observé que la forme et l'intensité de la signature sont dépendants des masques utilisés.

L'explication suivante peut être proposée : l'angle azimutal φ , défini comme l'angle entre la composante du vecteur d'onde contenu dans le plan de l'échantillon et, par exemple, la direction majoritaire des lignes du réseau, varie de 360° lors d'une rotation complète de la plaque. Ainsi, les motifs présents sur la surface sont illuminés avec des angles azimutaux

différents entraînant des variations d'intensité de lumière diffractée. Le mode d'acquisition ne pouvant pas être modifié, nous n'avons pas pu valider expérimentalement cette hypothèse, nous avons donc procédé à une étude par simulation en faisant varier l'angle azimutal. La Figure 4-36 montre que les résultats de simulation obtenus en utilisant un modèle « réseau de lignes simples » permettent de modéliser correctement cette signature.

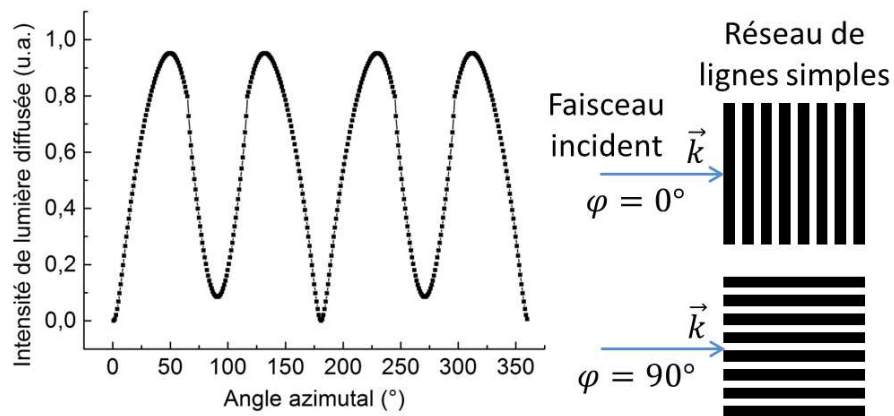


Figure 4-36 : Simulation de l'intensité de lumière diffusée, par une plaque structurée, en fonction de l'angle azimutal φ . Les paramètres du modèle utilisé sont renseignés à l'aide de données expérimentales issues de la plaque dont la mesure d'intensité de lumière diffusée est montrée Figure 4-37.

La Figure 4-37 montre la signature visible sur les données expérimentales.

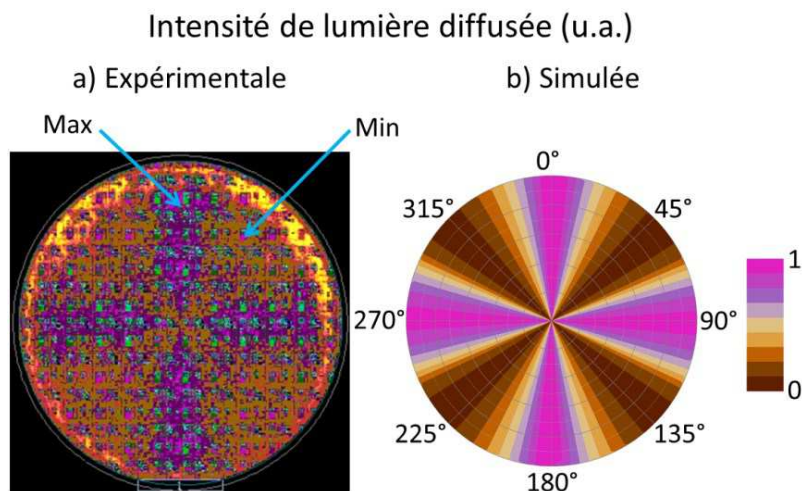


Figure 4-37 : Cartographie de l'intensité de lumière diffusée a) Expérimentale ; b) simulée.

Une acquisition de l'intensité de la lumière diffusée par la plaque en mode trame ou une vitesse de rotation adaptée, pourrait permettre d'atténuer ou de supprimer cette signature. Sa

suppression par un traitement de données post mesure peut également être envisagée. Bien sûr cela nécessiterait une étude complète et approfondie de la signature pour chaque intégration. Une combinaison de ces deux possibilités est également envisageable.

Les différents exemples abordés dans cette section confirment la pertinence de l'approche par simulation que nous allons maintenant utiliser pour étudier la sensibilité de la mesure de lumière diffusée à la densité, largeur et hauteur de grilles. Cette étude porte sur une plaque après polissage avec arrêt sur nitrure de silicium. Ces variations sont réalistes car une puce d'un nœud technologique donné présente différentes largeurs et densités de grilles. Ceci induit après polissage des variations de la hauteur des grilles.

La Figure 4-38 et la Figure 4-39 montrent que l'intensité de lumière diffusée est sensible à la largeur et à la densité de grilles. Notons qu'une valeur d'intensité de lumière diffusée peut correspondre à plusieurs configurations. Ainsi, afin de pouvoir extraire la topographie d'une mesure de lumière diffusée, celle-ci doit obligatoirement être traitée en prenant en compte les données du masque (densités et largeurs des structures).

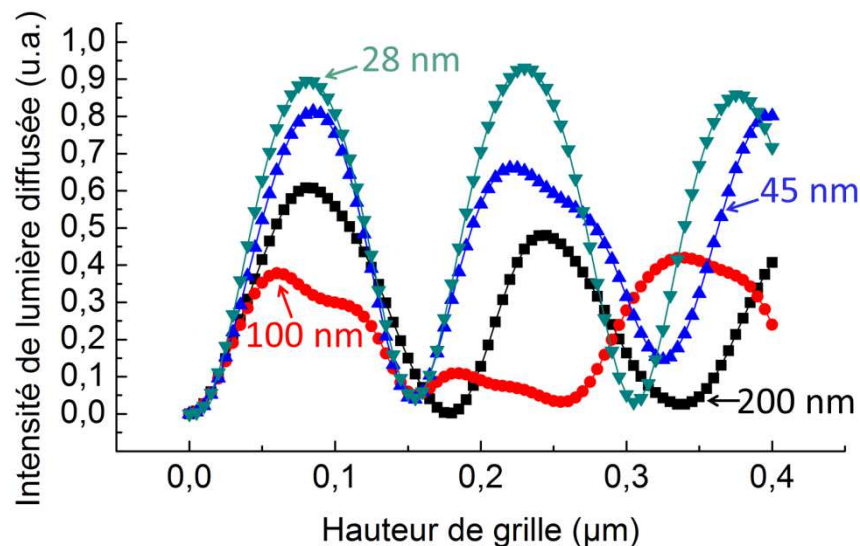


Figure 4-38 : Intensité de la lumière diffusée en fonction de la hauteur et largeur de grille pour une densité de structures de 17%.

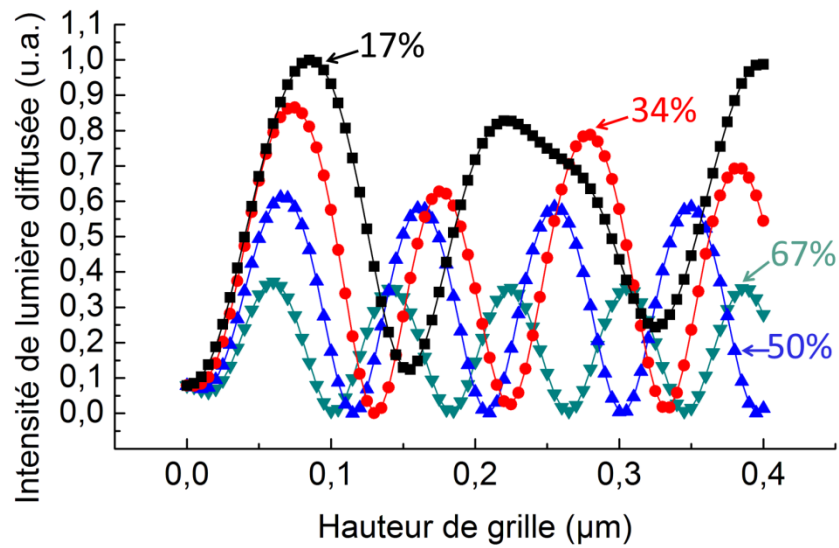


Figure 4-39 : Intensité de la lumière diffusée en fonction de la hauteur et densité de grilles pour une largeur de structure de 45 nm.

En résumé, bien que les structures réelles soient extrêmement complexes, les résultats de modélisation utilisant des structures simplifiées ont permis d'expliquer qualitativement les tendances observées expérimentalement ainsi que la présence d'une signature. Cette étude mériterait d'être approfondie en utilisant des modèles plus complexes.

IV. Conclusions

Les résultats expérimentaux et simulés, présentés dans ce chapitre, montrent l'intérêt de la mesure de la lumière diffusée pour le contrôle de la nano-topographie, induite par le procédé de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques.

L'approche expérimentale a permis de montrer que :

- la mesure de lumière diffusée présente une forte sensibilité à la densité de structures présentes sur la surface ;
- la cartographie de l'intensité de lumière diffusée fournit un moyen de contrôle de la non-uniformité de polissage et une information qualitative sur l'amplitude et l'étendue de la non-uniformité de polissage ;
- l'intensité de lumière diffusée est sensible aux variations nanométriques de la topographie de la grille.

La simulation a permis de mettre en évidence que :

- le phénomène de diffraction est prépondérant dans la génération de la lumière diffusée par une surface structurée ;
- la signature présente sur les cartographies d'intensité de lumière diffusée de plaques structurées, est due à la rotation de la plaque lors de la mesure ;
- l'intensité de lumière diffusée est sensible à la largeur et à la densité de grilles.

Cette étude montre également les limites actuelles des équipements utilisés pour la mesure de lumière diffusée, dans l'industrie microélectronique. Ainsi, on déplore l'absence d'interface adaptée au contrôle de la nano-topographie sur des distances centimétriques. La taille des pixels, 500 μm par 500 μm , n'est pas suffisante et la capacité d'extraction de données à l'échelle de la puce inexistante. Il semble donc que pour pouvoir exploiter le potentiel de cette technique une collaboration entre équipementier et industriel soit requise.

Bibliographie

- Aggarwal, R. R. and S. Parthasarathy (1951). "Diffraction of Light by 2 Ultrasonic Waves." Acustica **1**(2): 74-78.
- Arrazat, B., A. Danel, et al. (2007). "Characterization of CMOS sub-65 nm metallic contact by laser scattering: Thermal stability of Ni(Si_{1-x}Gex)." Microelectronic Engineering **84**(11): 2558-2562.
- Ashikhmin, M., S. Premoze, et al. (2000). "A microfacet-based BRDF generator." Siggraph 2000 Conference Proceedings: 65-74.
- Beckmann, P. and A. Spizzichino (1963). "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces." Goford, New York, Pergamon Press; distributed in the Western Hemisphere by Macmillan.
- Blinn, J. (1977). "Models for light reflection for computer synthesized pictures." Computer Graphics World **11**(2): pp. 192-198.
- Germer, T. (2008). "Modeled integrated scatter tool (MIST)." from http://www.nist.gov/pml/div685/grp06/scattering_mist.cfm.
- Germer, T. (2008). "Polarized Light Scattering C++ Class Library." from <http://pml.nist.gov/Scatmech/html/index.htm>.
- Halder, S., R. Vos, et al. (2009). "Use of Surface Haze for Evaluation of Photoresist Residue Removal Efficiency." Ieee Transactions on Semiconductor Manufacturing **22**(4): 587-591.
- He, X. D., K. E. Torrance, et al. (1991). "A comprehensive physical model for light reflection." Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM: 175-186.
- He, X. D., K. E. Torrance, et al. (1991). "A Comprehensive Physical Model for Light-Reflection." Siggraph 91 Conference Proceedings **25**: 175-186.
- Holsteyns, F., J. Roels, et al. (2003). "Monitoring and qualification using comprehensive surface haze information." 2003 International Symposium on Semiconductor Manufacturing proceedings, 378-381.

- Lambert, J. H. (1760). "Photometria sive de mensura de gratibus luminis, colorum umbrae." Eberhard Klett.
- Magnusson, R. and T. K. Gaylord (1978). "Equivalence of Multiwave Coupled-Wave Theory and Modal-Theory for Periodic-Media Diffraction." Journal of the Optical Society of America **68**(12): 1777-1779.
- Moharam, M. G. and T. K. Gaylord (1981). "Rigorous Coupled-Wave Analysis of Planar-Grating Diffraction." Journal of the Optical Society of America **71**(7): 811-818.
- Nayar, S. K., K. Ikeuchi, et al. (1991). "Surface Reflection - Physical and Geometrical Perspectives." Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **13**(7): 611-634.
- Nicodemus, F. E. (1977). Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. Washington, U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards : for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off.
- Oren, M. and S. K. Nayar (1994). "Generalization of Lambert's reflectance model." SIGGRAPH '94, 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques proceedings, 239-246.
- Phong, B. T. (1975). "Illumination for Computer Generated Pictures." Communications of the Acm **18**(6): 311-317.
- Stogryn, A. (1967). "Electromagnetic Scattering from Rough Finitely Conducting Surfaces." Radio Science **2**(4): 415-&.
- Suratwala, T. I., P. E. Miller, et al. (2005). "Polishing slurry induced surface haze on phosphate laser glasses." Journal of Non-Crystalline Solids **351**(24-26): 2091-2101.
- Tamir, T., A. A. Oliner, et al. (1964). "Wave Propagation in Sinusoidally Stratified Dielectric Media." Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques **Mt12**(3): 323-335.
- Torrance, K. E. and E. M. Sparrow (1967). "Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces." Journal of the Optical Society of America **57**(9): 1105-1114.
- Ward, G. J. (1992). "Measuring and Modeling Anisotropic Reflection." Siggraph 92 : Conference Proceedings **26**: 265-272.

- Xu, K., R. Vos, et al. (2003). "The haze of a wafer: A new approach to monitor nano-sized particles." Particles on Surfaces 8: Detection, Adhesion and Removal: 47-62.
- Xu, K., R. Vos, et al. (2003). "Relation between particle density and haze on a wafer: A new approach to measuring nano-sized particles." Ultra Clean Processing of Silicon Surfaces V **92**: 161-164.
- Zheng, Z. R., J. Zhou, et al. (2010). "Roughness characterization of well-polished surfaces by measurements of light scattering distribution." Optica Applicata **40**(4): 811-818.

Conclusion générale et perspectives

Cette conclusion résume les résultats marquants de ce travail de thèse et propose quelques perspectives.

La microscopie interférométrique a été mise en œuvre pour une caractérisation spatialement résolue (3,6 μm) de la nano-topographie sur des distances centimétriques. Les différentes limitations de cette technique ont été identifiées et résolues :

- les erreurs de mesure induites par la présence, sur la surface, de matériaux transparents ont été supprimées en déposant une couche de tantale ;
- les contributions topographiques indésirables ont été discutées et une méthodologie a été mise en place pour les éliminer ;
- la fiabilité de l'algorithme de recollement d'images a été démontrée ;
- une nouvelle méthode de mise à plat des données, spécifiquement développée pour des surfaces structurées de plusieurs centimètres carrés, a été proposée ;
- la justesse de la mesure a été vérifiée à plusieurs échelles à l'aide de la profilométrie mécanique choisie comme technique référence. Cette dernière a fait l'objet d'une étude approfondie pour permettre son utilisation comme technique de référence, dans le cadre d'une caractérisation spatialement résolue de la nano-topographie sur des distances centimétriques.

Il a été montré dans le cadre d'une collaboration, initiée durant cette thèse, avec l'équipementier NanometricsTM, que des équipements compatibles avec les normes SEMI et

prêts à être installés dans des lignes de production sont dotés des outils nécessaires pour répondre à la problématique de la thèse. La reproductibilité et la répétabilité de la mesure ont été analysées. Ces dernières, évaluées dans un contexte de recherche et de développement semblent adaptées pour une utilisation industrielle. Dans ce contexte, la microscopie interférométrique peut fournir, à l'industrie microélectronique, une technique de caractérisation spatialement résolue ($3,6\ \mu\text{m}$) de la nano-topographie sur des distances centimétriques, rapide (10 à 20 minutes pour $9\ \text{cm}^2$), non destructive et actuellement non disponible.

L'intérêt d'une mesure spatialement résolue ($3,6\ \mu\text{m}$) de la nano-topographie, induite par les procédés de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques a été démontré. En effet :

- la quantité importante d'information, plusieurs dizaines de millions de points, générée par ce type de mesure a été exploitée ;
- la topographie des boîtes de mesure est non-représentative de celle du circuit intégré.

Une méthodologie a été introduite afin de tirer profit de la quantité importante d'informations et fournir des valeurs représentatives de la topographie du circuit intégré. Cette méthodologie est basée sur l'utilisation de : l'amplitude de la topographie de la puce ; la courbe de distribution des hauteurs ; la courbe d'exclusion de points et la cartographie des hauteurs.

Cette méthodologie rend possible :

- l'extraction du pourcentage et de l'amplitude de la topographie des zones marginales⁶⁵ ;
- la localisation des zones marginales ;
- la caractérisation de l'impact topographique des zones marginales sur leur voisinage ;
- la détermination, à l'aide des cartographies de densité de structures, des conditions d'apparition des zones marginales ;

⁶⁵ Une zone marginale est une portion de la topographie de l'échantillon représentée par peu de points et présentant une différence de hauteur importante vis-à-vis du reste de la topographie.

- la caractérisation du comportement topographique d'un polissage à l'échelle d'un circuit intégré.

Ainsi, une caractérisation spatialement résolue ($3,6\text{ }\mu\text{m}$) de la nano-topographie, induite par les procédés de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques donne accès à de nouveaux paramètres plus représentatifs que ceux actuellement utilisés.

Enfin, des résultats expérimentaux et simulés ont montré l'intérêt de la mesure de la lumière diffusée pour le contrôle de la nano-topographie, induite par le procédé de polissage mécano-chimique, sur des distances centimétriques.

L'approche expérimentale a permis de montrer que :

- la mesure de lumière diffusée présente une forte sensibilité à la densité de structures présentes sur la surface ;
- la cartographie de l'intensité de lumière diffusée fournit un moyen de contrôle de la non-uniformité de polissage et une information qualitative sur l'amplitude et l'étendue de la non-uniformité de polissage ;
- l'intensité de lumière diffusée est sensible aux variations nanométriques de la topographie de la grille.

La simulation a permis de mettre en évidence que :

- le phénomène de diffraction est prépondérant dans la génération de la lumière diffusée par une surface structurée ;
- la signature présente sur les cartographies d'intensité de lumière diffusée de plaques structurées, est due à la rotation de la plaque lors de la mesure ;
- l'intensité de lumière diffusée est sensible à la taille et à la densité de structures.

Plusieurs perspectives se dégagent de ce travail. Parmi celles-ci :

- des collaborations avec des équipementiers permettraient d'adapter les équipements et leur interface afin de pouvoir intégrer les solutions développées durant ce travail de thèse et faciliter les futures caractérisations topographiques à l'échelle de la puce ;
- un partenariat avec le monde de la recherche académique pourrait également permettre d'approfondir l'étude portant sur la simulation de l'intensité de lumière diffusée. Ainsi, la mise en œuvre de modèles plus complexes que celui utilisé durant ce travail permettrait de mieux comprendre les mécanismes de formation de la lumière diffusée par une surface structurée ;
- la suppression des erreurs de mesure provenant des matériaux transparents présents sur la surface offre également une perspective intéressante. Dans ce contexte, la microscopie interférométrique DUV semble prometteuse ;
- enfin, l'évaluation d'une mesure rapide (deux à trois minutes) de la totalité de la plaque avec un pouvoir de résolution latérale et verticale faible, respectivement de l'ordre d'une centaine de microns en (x, y) et quelques nanomètres en z apparaît également être une perspective intéressante à ce travail de thèse. En effet, ce type de mesure pourrait également, théoriquement, répondre à la problématique de la thèse, néanmoins à ce jour aucune étude sur l'intérêt de ce type de mesure n'a encore été menée.

Annexe 1 : Mise à plat des données topographiques

Une nouvelle méthode de mise à plat des données topographiques est proposée. Cette méthode est mise en œuvre à l'aide du logiciel Matlab son principe est détaillé sur la Figure a-1.

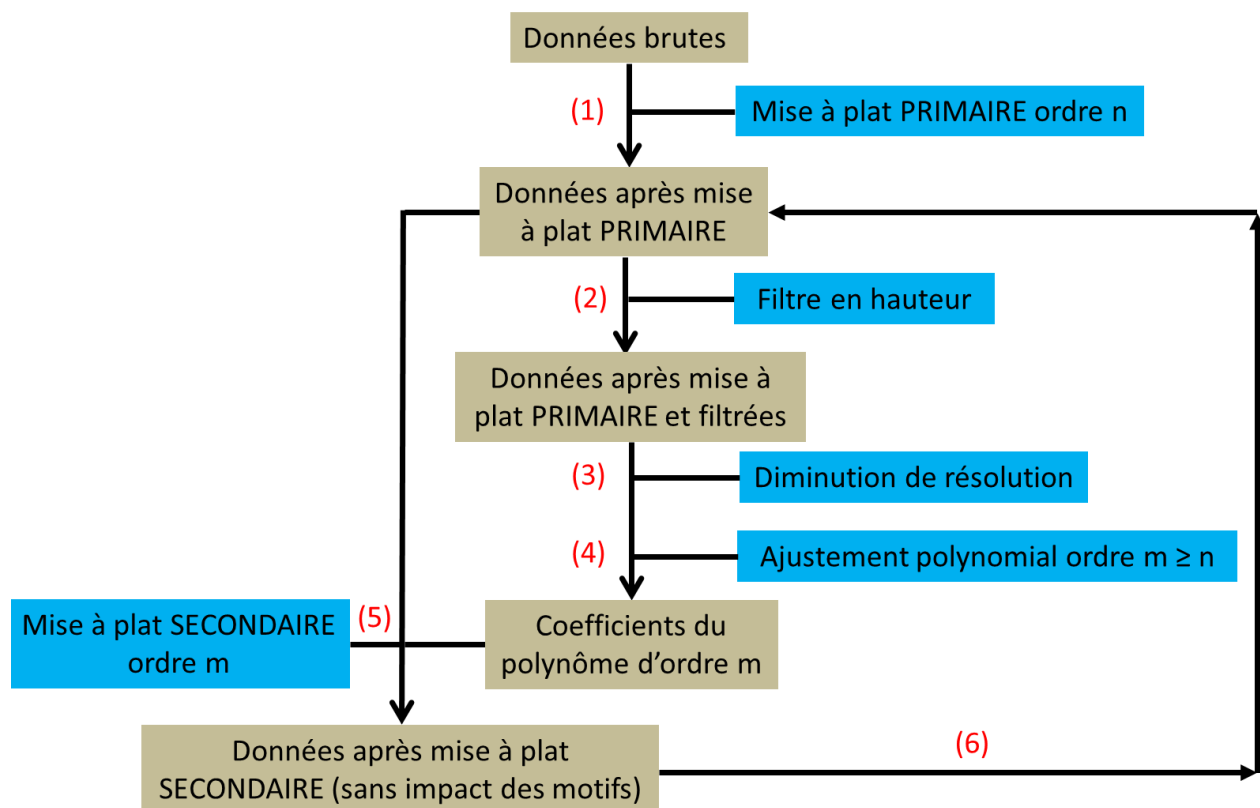


Figure a-1 : Schéma de principe de la méthode proposée de mise à plat des données topographiques.

Le rôle des différentes étapes de cette nouvelle méthodologie est illustré par un exemple en 2D afin de permettre une meilleure visualisation.

Etape 1 :

Une première mise à plat, dite PRIMAIRE, est appliquée sur les données topographiques brutes (Figure a-2).

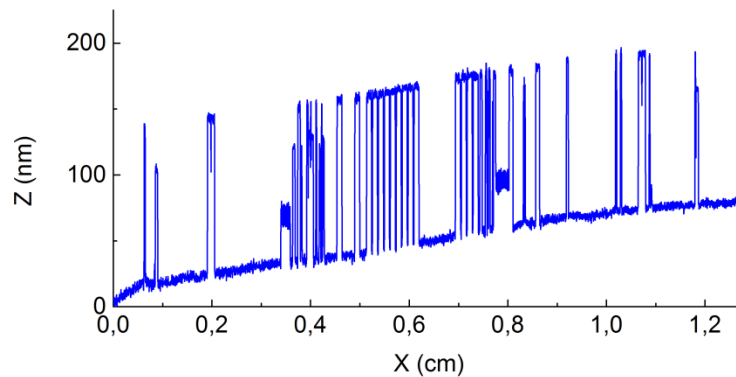


Figure a-2 : Données topographiques brutes.

Il s'agit d'une mise à plat effectuée à l'aide d'un ajustement polynomial de degré faible (ordre 1 dans l'exemple). Cette première étape a pour but de supprimer les contributions topographiques indésirables grossières, telles qu'une inclinaison de l'échantillon (Figure a-3).

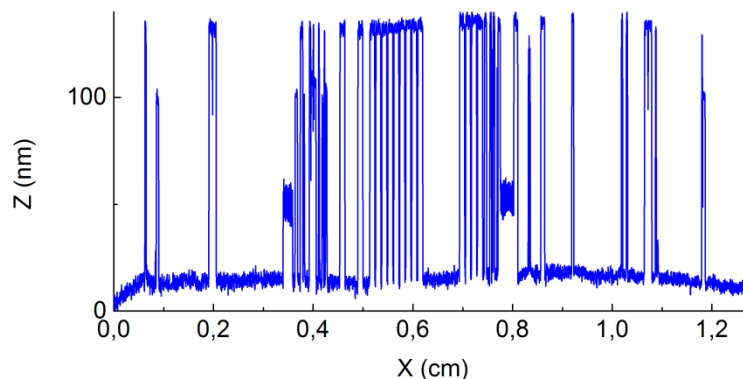


Figure a-3 : Données topographiques après mise à plat PRIMAIRE (ordre 1).

Etape 2 :

Un filtre en hauteur est appliqué sur les données topographiques issues de la mise à plat PRIMAIRE (Figure a-4). Le but de cette étape est de diminuer le poids des motifs par seuillage et élimination d'un maximum de points traduisant leur présence.

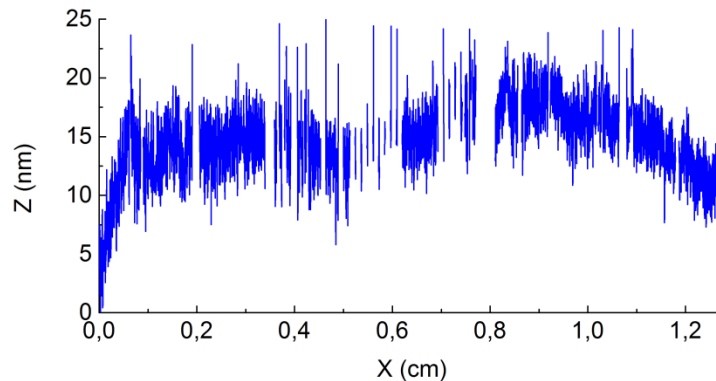


Figure a-4 : Données topographiques après application du filtre en hauteur.

Etape 3 :

Cette étape a pour objectif de diminuer la résolution par sous échantillonnage sans faire disparaître les contributions topographiques indésirables. Elle est permise car :

- La grande taille des zones caractérisées génère un nombre de points de mesure important (près 70 000 000 de points pour une surface de 8,7 cm² caractérisée avec une résolution latérale de 3,6 μ m) ;
- les contributions topographiques indésirables ont des longueurs d'onde élevées.

Cette étape est facultative mais peut s'avérer extrêmement importante pour deux raisons :

Mémoire vive des ordinateurs limitée

Le nombre important de points limite l'ordre du polynôme utilisé pour l'ajustement de l'étape suivante. Un ordinateur équipé de quatre giga-octets de mémoire vive est limité à un ajustement polynomial d'ordre 6 dans le cas d'une surface de 8,7 cm² caractérisée avec une résolution latérale de 3,6 μ m. La diminution de la résolution permet d'élever l'ordre, du polynôme utilisé pour l'ajustement, de quelques dizaines de degré.

Cadence de mesure/production

Dans le cas d'un ajustement polynomial d'ordre donné, la diminution du nombre de points permet de réduire le temps de calcul/mesure. Les caractéristiques de cette étape dépendront de son contexte d'utilisation.

Etape 4 :

Un ajustement polynomial de degré supérieur ou égal à celui utilisé pour la mise à plat PRIMAIRE est réalisé (ordre 2 dans l'exemple). Aucune mise en plat n'est effectuée durant cette étape ; l'objectif est seulement la détermination des coefficients du polynôme d'ajustement.

Etape 5 :

Les coefficients déterminés à l'étape 4 sont utilisés pour effectuer une mise à plat (dite SECONDAIRE) sur les données topographiques, non modifiées, ayant subi la mise à plat PRIMAIRE. La forme géométrique définie par les coefficients déterminés lors de l'étape précédente est supprimée (Figure a-6).

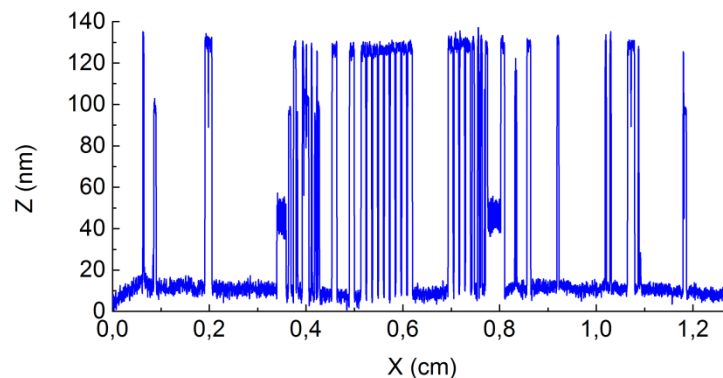


Figure a-5 : Données topographiques après mise à plat SECONDAIRE d'ordre 2.

Le résultat de la méthode classique (ici ajustement polynomial d'ordre 2) est reporté sur la Figure a-6 pour comparaison.

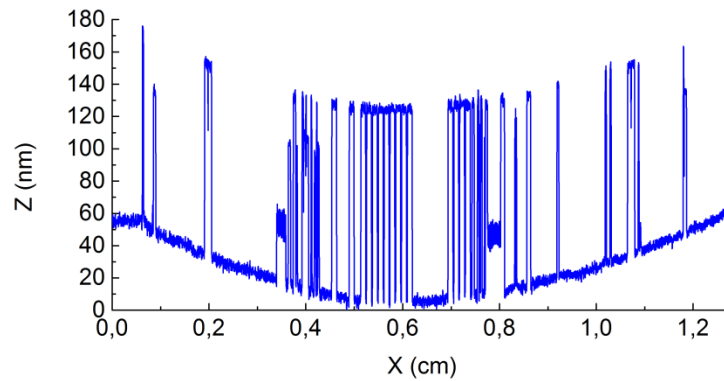


Figure a-6 : Données topographiques après mise à plat SECONDAIRE d'ordre 2 par la méthode classique.

Etape 6 :

Les étapes 2 à 5 sont réitérées jusqu'à ce que le résultat soit satisfaisant. La mise à plat secondaire équivaut alors à une mise à plat PRIMAIRE optimisée. Ceci permet d'appliquer un filtre en hauteur supprimant plus de points représentant les motifs. De cette manière il est possible « en théorie » de supprimer l'intégralité des points représentant les motifs et d'effectuer une mise à plat par ajustement polynomial de degré quelconque sans crainte d'ajuster les structures présentes sur la surface.

L'efficacité de la méthode est illustrée sur la Figure 2-31.

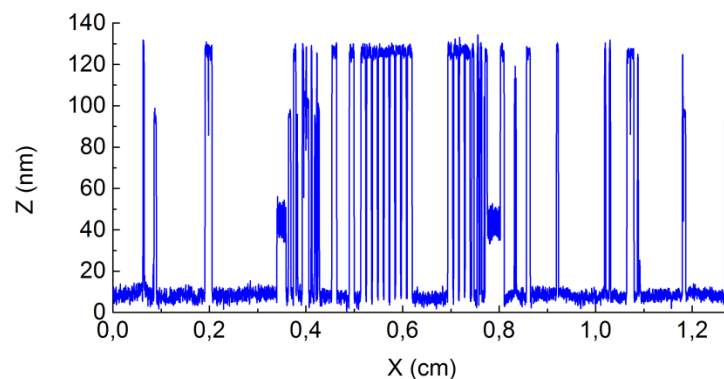


Figure a-7 : Données topographiques après une itération et mise à plat SECONDAIRE d'ordre 10.

Les ordres des polynômes et les caractéristiques du filtre en hauteur (pour chaque itération) sont à définir en fonction de la taille de la zone à mettre à plat et du type d'échantillon. Ces paramètres peuvent être fixés dans une recette.

Un ajustement polynomial d'ordre 2 a été utilisé dans cet exemple lors de la première mise à plat SECONDAIRE afin d'illustrer l'efficacité de la méthode vis-à-vis de la méthode classique. Si l'efficacité du filtre en hauteur le permet, il est possible d'effectuer une première mise à plat SECONDAIRE par ajustement polynomial d'ordre élevé.

Un temps d'exécution minimum nécessite des degrés de polynôme maximums lors de la première itération. Dans le cas de la mise à plat PRIMAIRE cela permet d'effectuer un filtre en hauteur plus efficace et donc d'augmenter le degré du polynôme utilisé pour la mise à plat SECONDAIRE. Concernant la mise à plat SECONDAIRE cela permet de diminuer le nombre d'itération et donc de diminuer le temps de calcul.

Annexe 2 : Programmes Matlab développés

Les programmes Matlab suivants ont été développés durant ce travail de thèse et sont disponibles par demande auprès de Carlos Beitia : carlos.beitia@cea.fr.

Traitement d'un profil topographique (x, z) :

- pg1 : mise à plat des données topographiques par ajustement polynomial ;
- pg2 : filtre en hauteur des données topographiques ;
- pg3 : mise à plat des données topographiques par la méthode présentée en annexe 1 ;
- pg4 : extraction de la courbe de distribution des hauteurs ;
- pg5 : extraction de la courbe d'Abbott-Firestone ;
- pg6 : extraction de la courbe d'exclusion de points introduite dans le chapitre 3 ;
- pg7 : extraction du pourcentage de zones problématiques ;
- pg8 : extraction de l'amplitude des zones problématiques ;
- pg9 : affichage du profil en vue de côté (coupe).

Traitement de plusieurs profils topographiques (x, z) de coordonnée y différente :

- pg10 : mise à plat des données topographiques par un ajustement polynomial identique pour tous les profils ;
- pg11 : mise à plat des données topographiques par un ajustement polynomial différent pour chaque profil ;
- pg12 : filtre en hauteur des données topographiques identique pour tous les profils ;
- pg13 : filtre en hauteur des données topographiques différent pour chaque profil ;

- pg14 : mise à plat des données topographiques par la méthode présentée en annexe 1 identique pour tous les profils ;
- pg15 : mise à plat des données topographiques par la méthode présentée en annexe 1 différente pour chaque profil ;
- pg16 : extraction de la courbe de distribution des hauteurs ;
- pg17 : extraction de la courbe d'Abbott-Firestone ;
- pg18 : extraction de la courbe d'exclusion de points introduite dans le chapitre 3 ;
- pg19 : extraction du pourcentage de zones problématiques ;
- pg20 : extraction de l'amplitude des zones problématiques ;
- pg21 : affichage des profils (superposés) en vue de côté (coupe) ;
- pg22 : affichage des profils en 3D ;
- pg23 : affichage des données topographiques en vue de dessus avec échelle de couleur et intrapolation entre les profils.

Traitement de données topographiques (x, y, z) présentant le même échantillonnage spatial en x et en y :

- pg24 : extraction des données topographiques d'un fichier .opd format brukerTM ;
- pg25 : extraction des données topographiques d'un fichier .dat ;
- pg26 : mise à plat des données topographiques par ajustement polynomial ;
- pg27 : filtre en hauteur des données topographiques ;
- pg28 : mise à plat des données topographiques par la méthode présentée en annexe 1 ;
- pg29 : extraction de la courbe de distribution des hauteurs ;
- pg30 : extraction de la courbe d'Abbott-Firestone ;
- pg31 : extraction de la courbe d'exclusion de points introduite dans le chapitre 3 ;
- pg32 : extraction du pourcentage de zones problématiques ;
- pg33 : extraction de l'amplitude des zones problématiques ;
- pg34 : affichage des données topographiques en vue de dessus avec échelle de couleur.

Valorisations scientifiques

Conférences

Titre : Haze as an indirect characterization technique on patterned wafers.

Type : Oral.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, F. Gaillard, C. Euvrard, Y. Morand, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Conférence : International Conference on Planarization/CMP Technologies 2011 (ICPT 2011, Séoul, Corée du Sud).

Titre : Interferometry: a direct die level characterization technique.

Type : Oral.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, Y. Morand, C. Euvrard, V. Balan, J. Peak, T. Johnson, S. Gaillard, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Conférence : International Conference on Planarization/CMP Technologies 2012 (ICPT 2012, Grenoble, France).

Titre : Haze used as wafer, die and intra-die indirect characterization technique for advanced CMP processes on patterned wafers.

Type : Poster.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, C. Euvrard, Y. Morand, S. Gaillard, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Conférence : International Conference on Planarization/CMP Technologies 2012 (ICPT 2012, Grenoble, France).

Titre : Development of high resolution topographic characterization at die scale by interferometry.

Type : Poster.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, S. Gaillard, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Conférence : International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics 2013 (FCMN 2013, Gaithersburg, USA).

Titre : High resolution topography characterization at die-scale of front end CMP processes.

Type : Oral.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, S. Gaillard, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Conférence : Material Research Society spring 2013 (MRS Spring 2013, San Francisco, USA).

Publications

Titre : Haze as an indirect characterization technique on patterned wafers.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, F. Gaillard, C. Euvrard, Y. Morand, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Revue : Proceeding International Conference on Planarization/CMP Technologies 2011 (ICPT 2011).

Titre : Interferometry: a direct die level characterization technique.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, Y. Morand, C. Euvrard, V. Balan, J. Peak, T. Johnson, S. Gaillard, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Revue : Proceeding International Conference on Planarization/CMP Technologies 2012 (ICPT 2012).

Titre : Haze used as wafer, die and intra-die indirect characterization technique for advanced CMP processes on patterned wafers.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, C. Euvrard, Y. Morand, S. Gaillard, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Revue : Proceeding International Conference on Planarization/CMP Technologies 2012 (ICPT 2012).

Titre : Development of high resolution topographic characterization at die scale by interferometry.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, S. Gaillard, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Revue : Proceeding International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics 2013 (FCMN 2013).

Titre : High resolution nanotopography characterization at die scale of 28nm FDSOI CMOS Front-End CMP processes.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, S. Gaillard, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Revue : Microelectronics engineering, vol 113, 105-108.

Titre : Study of diffused light measurements on patterned wafers using simulation.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, S. Gaillard, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Revue : Wear. (Soumise)

Titre : Die level topography behaviors of selective and non-selective polishing step.

Auteurs : F. Dettoni, C. Beitia, S. Gaillard, O. Hinsinger, F. Bertin, M. Rivoire.

Revue : à déterminer. (En rédaction)

Brevet

Titre : Procédé de caractérisation de la topographie d'une surface.

Inventeurs : F. Dettoni, C. Beitia.

Numéro de dépôt : FR 13 54687.

Récompense

Titre : Best student paper award, "Interferometry: a direct die level characterization technique"

Conférence : International Conference on Planarization/CMP Technologies 2012 (ICPT 2012, Grenoble, France).

—